



المشروع القومي للترجمة

غبار النجوم

إعادة تدوير
النجوم و الكواكب و البشر



911

تأليف :
جون جريبين

ترجمة :
عزت عامر

المشروع القومى للترجمة

إشراف: جابر عصفور

العدد: ٩٦٦

غبار النجوم (إعادة تدوير النجوم والكواكب والبشر)

جون جريبين مع مارى جريبين

ترجمة: [illegible] عامر

الطبعة الأولى ٢٠٠٥

هذه ترجمة لكتاب:

Stardust : The Cosmic recycling of stars, Planets and People

By: John Gribbin

Copyright © John and Mary Gribbin, 2001

حقوق الترجمة والنشر بالعربية محفوظة للمجلس الأعلى للثقافة.

شارع الجبلاية بالأوبرا - الجزيرة - القاهرة ت ٧٣٥٢٣٩٦ فاكس ٧٣٥٨٠٨٤

El Gabalaya St., Opera House, El Gezira, Cairo

Tel: 7352396 Fax: 7358084

تهدف إصدارات المشروع القومى للترجمة إلى تقديم مختلف الاتجاهات والمذاهب الفكرية للقارئ العربى وتعريفه بها ، والأفكار التى تتضمنها هى اجتهادات أصحابها فى ثقافاتهم ولا تعبر بالضرورة عن رأى المجلس الأعلى للثقافة.

المحتويات

قائمة الرسومات التوضيحية الملونة

إنه لأمر غير مقبول

الظن بأن الطبيعة على الأرض تنتج ذهبا

فورا فى لحظة . بل هناك شىء سبق أن حدث

ولابد أنه قد وقع أمر بالغ القدم

بن جونسون

« الخيميائى »

شكر وتقدير

أشكر فرجينيا تريميل لقراءة مجمل النص والتعليق عليه ، رغم أنني لم أتبع نصائحها دائمًا ، ولقد أدت هذه المراجعة إلى تحسين العرض التاريخي لقصتي هذه إلى حد بعيد . وأشكر أيضًا جوناثان جريبين لإنجازه الرائع كما هو متوقع للأشكال التوضيحية في هذا الكتاب .

مقدمة المترجم

مع الاكتشافات الحديثة فى علم الفلك والنظريات الجديدة حول الانفجار العظيم فى بداية الكون ، يُعاد بناء تصوراتنا عن الكون وعن أنفسنا . وفى هذا الإطار يقدم جون جريبين أهم الافتراضات العلمية فى مجال البحث عن التطورات الكونية التى أدت إلى ظهور الحياة على الأرض ، ووجودنا نحن لكى نتأمل هذا الكون فائق الكمال والجمال وتنطلق فى رحلة معرفته معرفة تزداد دقة وإحكاماً مع تنامى الاكتشافات وتطور التقنيات .

ولكى يصل المؤلف إلى أن كل ما فى الكون الراهن - حتى نحن - يعود إلى سحب ما بين النجوم ، حيث تنشأ النجوم وتتلاشى ليُعاد إنتاجها من المادة الخام نفسها ، ذرات غبار ما بين النجوم ، فى عملية دائمة لإعادة تدوير النجوم والكواكب والبشر ، يعرض فى كتابه هذا كيف تأسس الكون بطريقة تجعل إنتاج الكربون والأوكسجين والنتروجين بهذه الوفرة نتيجة لا مفر منها لدورات حياة النجوم ، وأساساً لابد منه لظهور الكائنات الحية .

ويعرض أيضاً كيف تناثرت هذه العناصر فى سحب ما بين النجوم ، لكى تلعب دوراً حاسماً فيما بعد فى ظهور الجزيئات العضوية، ومن ثم الحياة على الأرض . فكان من المحتم أن تتشكل كواكب مثل الأرض حول نجوم مثل الشمس تتناثر فيها جزيئات عضوية معقدة، يعود أصلها إلى سحب ما بين النجوم ، عندما تصل المذنبات إلى هذه الكواكب . ويعود أصلنا المادى إلى غبار النجوم؛ لأننا نتيجة طبيعية لوجود النجوم ، ومن هذا المنظور من المستحيل التصديق بأننا وحدنا فى الكون .

ورغم الاطمئنان إلى النظريات والنماذج والفرضيات المتعلقة بالانفجار العظيم وظهور النجوم والكواكب ، يعترف المؤلف بأن أحداً لم يفهم حتى الآن كيف جمعت

لبنات الحياة لأول مرة نفسها لتصبح جزيئات حية . لكن بمجرد ظهور أول خلايا حية ، منذ نحو ٣,٨ مليار سنة ، فإن ما حدث بعد ذلك واضح المعالم نسبيًا ومفهوم إلى درجة مقبولة .

ولا يجب أن يقلل من يقيننا العلمي كثرة اللجوء إلى الافتراضات والنماذج فيما يتعلق ببداية الكون وبداية الحياة ؛ فالأمر متروك للتجارب وعمليات الرصد ، ومسار التطورات العلمية ، مما يجعلنا نطمئن دائمًا إلى جدوى وصحة المنهج العلمي ، حتى مع وجود عنصر التأمل في بعض الأحوال . فالتأمل تخمين قائم على الملاحظات والتجارب السابقة ، إضافة إلى حدس حول طبيعة العالم . وليس من المستبعد أن يكون إسحاق نيوتن قد وقف متأملاً يقول بينه وبين نفسه : "ماذا لو أن هناك قوة جاذبية أرضية أسقطت التفاحة إلى أسفل بمجرد انفصالها من غصنها؟" ثم يتم بعد ذلك اختبار التخمين ، ووضع تنبؤات على هيئة معادلات أو نظريات يمكن مقارنتها بنتائج التجارب والملاحظات حول طبيعة ما يحدث في الواقع .

عزت عامر

٢٠٠٥/٣/٧

مقدمة لطبعة بنجوين

عليك أن تكتشفها هنا أولاً !

في يناير ٢٠٠١ أصاب علماء من مركز أميس للأبحاث التابع لناسا ومن جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز، كثيراً من زملائهم بالدهشة واحتلوا عناوين الأخبار عندما أعلنوا نتائج تجاربهم التي أجروها في مختبراتهم هنا على الأرض. التجارب التي نتج عنها جزيئات عضوية في ظروف تشبه تلك الموجودة في السحب المتكونة من غاز وغبار ما بين النجوم. وتم خلال هذه التجارب المحافظة على مزيج من مادة جليدية من المعروف وجودها في هذه السحب (والتي تتكون من الماء والميثانول [1] والنشادر وثاني أكسيد الكربون متجمدة معًا)، في فراغ بارد، وعُولجت بأشعة فوق بنفسجية. وينتج عن التفاعلات الكيميائية التي حفزتها الأشعة (تلك التي تشبه أشعة النجوم حديثة النشأة والتي تتعرض لها السحب الحقيقية ما بين النجوم) تشكيلة من المركبات العضوية التي ينتج عنها بشكل تلقائي، بمجرد غمرها بالماء، تشكيلات ذات أغشية تشبه فقاعات الصابون. ومن المعروف أن كل الحياة على الأرض قائمة على الخلايا، وتكتسي أكياس المادة البيولوجية بمثل هذا النوع من الأغشية. ويُستنتج من هذا الاكتشاف أن الفضاء مليء بالمركبات الكيميائية التي يمكنها بسهولة أن تعطي الدفعة الأولى للحياة إذا هبطت في بيئة مناسبة، مثل سطح الأرض. ومن المعروف أن المذنبات التي تتكاثر في الجزء الخارجي من مجموعتنا الشمسية، وتمر أحيانًا خلال المناطق الداخلية القريبة من الأرض، تتكون غالبًا من مادة بدائية موجودة ما بين الكواكب تبقت من عملية تكوين الشمس والكواكب بواسطة أحد هذه السحب ما بين النجوم؛ لذلك فإنه من الأرجح أن يحتوي أي كوكب مثل الأرض على بذور من المادة الخام الضرورية للحياة

(١) الميثانول: سائل كحولي ملتهب سام (المترجم)

عادة بمجرد تشكله. ولقد احتل هذا الاكتشاف العناوين الرئيسية للأخبار، وهو أمر أصاب الباحثين أنفسهم بالدهشة. وفي مقالة ظهرت في "الإندبندنت" بتاريخ ٣٠ يناير ٢٠٠١، نُقل عن رئيس فريق الباحثين لوي ألاموندولا قوله "توقعنا أن تصنع الأشعة فوق البنفسجية بضعة جزيئات قد يكون لها أهمية بيولوجية ما، ولم نتوقع أكثر من ذلك. لكن هذه العملية حولت بعض المواد الكيميائية البسيطة التي يشيع وجودها في الفضاء إلى جزيئات أكبر، تسلك طرائق أكثر تعقيداً بكثير مما توقعنا. ويرى الكثيرون أنها مهمة بالنسبة لأصل الحياة". ولعل دهشة هؤلاء الباحثين، والصحفيين الذين يملاهم الشغف في صياغة عناوينهم الرئيسية، من هذا الاكتشاف وما يتضمنه من نتائج بالنسبة لأصل الحياة على الأرض، تقل إذا ظلوا مواكبين للقصة التي يعرضها هذا الكتاب. فليس هناك ما هو جديد - كما سنرى - حول فكرة أن المادة العضوية المعقدة تكونت في الفضاء من الذرات البسيطة والجزيئات بواسطة الأشعة فوق البنفسجية، وليس هناك أيضًا ما هو جديد بالنسبة للقول بأن هذه الأشكال القديمة للحياة قد جاءت إلى الأرض عن طريق المذنبات. لكن هذه القصة تمثل بالفعل النتائج المعتادة لتطبيق المنهج العملي. وتقدم النسخة الأولى من هذا الكتاب بشكل رئيسي أسس التنبؤ بأن الجزيئات المعقدة (وحتى التكوينات الشبيهة بالخلية) كانت موجودة بالضرورة في هذا النوع من سحب ما بين النجوم التي تشكلت منها مجموعات الكواكب التي تشبه كوكبنا. وقد تم في الوقت الراهن إثبات صحة هذه النبوءة بواسطة التجارب، التي رفعت من قدر الأفكار المقدمة في هذا الكتاب، من مجرد افتراضات إلى نظرية مكتملة النمو. وليس هناك مجال للشك تقريبًا في أن الحياة يشيع ظهورها في الكون (ولا يعني ذلك القول بأن الحياة **الذكية** شائعة). ولمعرفة السبب واصل القراءة.

جون جريبين

٢ مارس ٢٠٠١

مقدمة

موقعنا في الكون

تبدأ الحياة مع عملية تكوين النجوم. ونحن نشأنا من غبار النجوم.

وكل ذرة من كل عنصر في جسمك فيما عدا الهيدروجين صُنعت داخل النجوم، وانتشرت عبر الكون في انفجارات نجمية هائلة، وأُعيد تدويرها لتصبح جزءًا منك. ويعتبر الهيدروجين مادة بدائية، نتجت عن الانفجار العظيم، مع الهليوم (ولا يوجد هليوم في جسمك). ويشكل الهيدروجين والهليوم معًا المادة الخام للجيل الأول من النجوم، الذي يعود إلى نحو ١٢ مليار [٢] عام، أما ما يخص أي شيء آخر فقد تكون بالاندماج النووي في أفران النجوم.

وكنت ألاحظ جاذبية هذا الاكتشاف وتأثيراته الشديدة كلما قدمت محاضرة عامة حول علم الفلك وذكرت هذه العلاقة المؤكدة بيننا وبين النجوم. وكثيرًا ما تلقيت أسئلة تقول "لماذا لا تكتب كتابًا حول هذا الموضوع؟" وكانت إجابتي "سوف أفعل ذلك في الوقت الملائم". وحان الوقت الآن، وقررت كتابة هذا الكتاب إثر موجة من اكتشاف كواكب تدور حول نجوم أخرى في مجرة درب اللبانة. فإذا كان هناك نجوم أخرى، وربما مجموعات شمسية مثل مجموعتنا، فإن احتمالات العثور على أشكال أخرى من الحياة في الكون تزداد بمعدل كبير. ولكن يبدو لي قبل الغوص في التوقعات حول الحياة خارج الأرض، أنه من الواجب أن نفهم موقعنا في الكون. ولديّ أمل في إقناعك بأننا

(٢) خلال كل الكتاب نسمي البليون مليارًا وهو ألف مليون لأن استخدامه أكثر شيوعًا. المترجم

نتاج طبيعى فى الكون الذى نحيى فيه. لذلك فإنه من الطبيعى أن نتوقع وجود أشكال أخرى من الحياة فى أماكن أخرى فى الكون، قد تشبه الحياة لدينا إلى حد ما.

وحيث إننا نرى الآن أن كل ما هو موجود على الأرض (بما فى ذلك وجودنا نفسه) هو نتيجة ثانوية لوجود النجوم ودرب اللبانة الذى نعيش فيه، فمن المرجح تماماً وجود كواكب مثل كوكبنا، وظهور حياة أخرى مثل الحياة لدينا. لكننى لا أنوى تخمين كيفية نشوء الحياة أو بحث ذلك بدقة، أو حتى التحديد الدقيق للمكان المحتمل لوجود هذه الحياة خارج كوكبنا. وقيمة القصة التى سوف أحكيها تعود إلى اعتمادها فى أغلب الأحوال على الحقائق، وليس التخمين.

ولقد بدأت القصة فى العشرينيات، عندما بدأ علماء الفلك يدركون أن نجماً مثل الشمس مكون بالفعل فى معظمه، حتى فى عصرنا الراهن، من الهيدروجين والهليوم. وكانوا قبل ذلك يعتبرون النجوم متكونة فى الأغلب من نوع المادة نفسها التى تتكون منها كواكب مثل الأرض - أى غنية بالحديد، العنصر الأكثر استقراراً. وتنشأ قصة أننا ناتجين عن الغبار الكونى، وأننا نعتبر لذلك أبناء النجوم، عن معرفتنا التى تطورت خلال عدة عقود لاحقة حول طبيعة النجوم نفسها. ولم تكن صدفة أن يحدث هذا التطور فى ذلك الوقت؛ لأنه اعتمد على كلٍّ من نظرية النسبة الخاصة والفيزياء الكمية، اللتين تضمنتا أفكار كانت فى حد ذاتها جديدة بالنسبة للعلم فى بداية القرن العشرين. وفى القرن التاسع عشر كانت حقيقة أن النجوم تظل ملتهبة أحد الألغاز الضخمة التى تواجه ليس فقط علماء الفلك ولكن علماء الفيزياء أيضاً.

وترتبط قصة الغبار الكونى أيضاً ارتباطاً لا يمكن تجاهله بفكرة ميلاد الكون فى الانفجار العظيم. وكان جورج جامو قد أثبت فى الأربعينيات أن الانفجار العظيم أنتج هيدروجين وهليوم. ورغم البرهنة اللاحقة على خطأ وصفه التفصيلى لكيفية تطور العناصر الأكثر ثقلاً من تلك العناصر البدائية، فإنه أعلن سعادته بأن الهيدروجين والهليوم معا يمثلان ٩٩ فى المائة من مادة الكون المعروفة لدى علماء فلك الأرصاد فى ذلك الوقت. وفى الخمسينيات أوضح فريق ترأسه عالم الفيزياء الفلكية البريطانى فريد هويل كيف يمكن للواحد فى المائة الباقى من هذه المادة أن يصنع داخل النجوم، ثم

عاد هويل وزملاؤه فى الستينيات إلى فكرة الانفجار العظيم لتفسير التفاصيل الدقيقة لهذه العمليات التى تم خلالها إنتاج المادة الخام للجيل الأول من النجوم. وركز علماء الفيزياء الفلكية فى السبعينيات والثمانينيات على تفاصيل سلوك المتجدد الأعظم (السوبرنوفا) [٢] ، وهى انفجارات للنجوم تنشر المواد الخام لأجيال جديدة من النجوم والكواكب والبشر عبر الكون - ويقوم هؤلاء العلماء الآن بمحاكاة بعض جوانب هذه الأحداث فى معجلات الجسيمات هنا على الأرض.

هذه هى القصة التى علىّ أن أحكيها، وهى تركز على الجانب الأساسى فى العلاقة بيننا وبين الكون. ذلك الجانب الذى يبحث عن كيفية ظهور العناصر الكيميائية التى يتكون منها أجسامنا فى داخل النجوم ونشرها فى الفضاء. وبسبب العلاقة الوثيقة بين حياة النجوم والحياة فى الكون، كان من المتعذر تجنب وجود بعض التداخلات فى كتبى المبكرة عن علم الكون، خاصة فى كتاب "ميلاد الزمان". وأتمنى ألا يكون ذلك قد بدا لأى من قراء هذه الكتب خارجاً عن المألوف، فبالنسبة لى فإن الطريقة التى تتآلف من خلالها قطع لعبة تجميع الأجزاء الكونية معاً فى تركيبة واحدة محبوكة، هى فى حد ذاتها أحد الاكتشافات التى توضح أن المشروع الكامل للعلم يسير على المسار الصحيح تماماً لفك طلاسم الأسرار الكونية.

وفى صميم هذه القصة توجد ظواهر السوبرنوفا، تلك الانفجارات النجمية الضخمة حيث يتألق نجم واحد وقتاً قصيراً كما لو كانت له إضاءة مائة مليار نجم عادى مثل الشمس. وسوف أسمح لنفسى فى نهاية القصة ببعض التأمل فى العلاقة بين الحياة والكون - أو الأكوان. ولرسم المشهد كاملاً فإننا نحتاج من جانب آخر إلى قليل من المعرفة بموقعنا فى الكون. فإذا كنت على معرفة بالفعل ببنية المجموعة الشمسية، وطبيعة كواكبها وكيف تشكلت تبعاً لآراء علماء الفلك، فلن تفقد الكثير إذا أغفلت قراءة بقية هذه المقدمة وتقدمت مباشرة إلى صلب الكتاب. وعلى القراء الجدد لهذه القصة، أو من يريدون استعادتها، أن يواصلوا القراءة.

(٢) متجدد أعظم (سوبرنوفا) Supernova : ظاهرة سماوية نادرة الحدوث ينفجر فيها النجم ويظهر ... لأيام لفترة قصيرة، ويصدر كمية كبيرة من الطاقة - المترجم.

الشمس نجم، وهي واحد من بضع مائة مليار نجم مشابه تشكل معًا منظومة تشبه القرص يطلق عليها درب اللبّانة أو المجرة. ويبلغ قطر قرص درب اللبّانة بالتقريب نحو مائة ألف سنة ضوئية، مما يعني في الواقع أن الضوء يحتاج إلى ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية لقطع هذه المسافة (ذلك مع العلم بأن سرعة الضوء ٣٠٠٠٠٠ كيلومتراً في الثانية).

وتدور الشمس مع عائلتها من الكواكب، المجموعة الشمسية، حول مركز درب اللبانة على مسافة تبتعد بنحو ثلثي المسافة بين المركز ومحيط القرص، وتحتاج إلى بضع مئات الملايين من السنوات لكي تكمل دورة واحدة. وتبدو الشمس نجمًا مألوفًا في جزء عادي من درب اللبّانة، ويبدو درب اللبّانة مجرة عادية، أحد الأجرام المتشابهة البالغ عددها نحو عدة مئات المليارات، والتي تنتشر في الكون المرئي بكامله. ولكي نتصور حجم الشمس علينا أن نعرف أن قطرها أكبر من قطر الأرض بمائة مرة تقريباً؛ لذلك فإن حجمها (المتناسب مع مكعب قطرها) أكثر مليون مرة تقريباً من حجم الأرض. ومثلها مثل بقية الكواكب فإن الشمس تتوهج بسبب التفاعلات النووية التي تحدث داخلها وتنتج طاقة (وسوف نعرف المزيد عن ذلك لاحقًا).

وتصحب الشمس عائلة من الكواكب والأجرام الأصغر، وتدور كلها حول الشمس (وتحافظ على مدارها بواسطة جاذبية الشمس) وتمثل معًا ما نعرفه باسم المجموعة الشمسية. وهناك أربعة كواكب صخرية صغيرة نسبياً تدور على مسافات أقرب نسبياً من الشمس، وهي كواكب عطارد والزهرة والأرض والمريخ. وتحيط بمداراتها منطقة توجد فيها ملايين من الكتل الصخرية الكونية تمثل حزامًا أو حلقة حول الشمس، الذي يعرف باسم حزام الكويكبات؛ حيث يوجد مليون كويكب على الأقل قطر كل منها أكثر من كيلومتر، وعدد لا يحصى من قطع الحطام الأصغر. وبعد حزام الكويكبات توجد أربعة كواكب غازية ضخمة هي المشترى وزحل وأورانوس ونبتون. ويتم عادة الرفع من شأن الجرم التاسع بلوتو بتسميته "كوكبًا" رغم أنه مجرد كرة من الجليد لا يتجاوز حجمها ثلثي حجم قمرنا. وبعد مدار بلوتو هناك حشد هائل من الأجرام الجليدية تسمى مذنبات.

ولكي لا ننشغل بالتفاصيل، فهناك سمتان مهمتان فقط بالنسبة لهذه المجموعة الشمسية لنضعها في الاعتبار هنا. الأولى أن هناك كواكب صغيرة صخرية قريبة من الشمس، وكواكب غازية أكبر أكثر بعداً. والثانية (والأكثر أهمية) أن كل شيء حتى مدار بلوتو (أو تبعد قليلا في الواقع) يدور حول الشمس في الاتجاه نفسه، وعلى المستوى نفسه، مثل العدائين يجرون في مساراتهم حول مضمار كوني للجري. وتدور أغلب الأقمار حول كواكبها وتدور أغلب الكواكب حول محاورها في الاتجاه نفسه . وهذا دليل بالغ القوة يدعم فكرة أن المنظومة الشمسية كلها تشكلت من سحابة دوارة من الغاز والغبار في الفضاء انهارت تحت تأثير ثقلها الخاص. ومع تقلصها كانت تدور بسرعة أكثر وأكثر، مثل متزلجة على الجليد تدور حول نفسها وهي تضم ذراعيها، جاعلة المادة المتبقية تستقر على هيئة قرص يدور حول النجم الوليد في نفس الاتجاه الذي كان يدور فيه النجم. وأخيراً تشكلت الكواكب من هذا القرص المتكون من الغبار، لكنني أعني علماً أنها تكونت من "بقايا" مادة. ويعتبر نحو ٩٩٫٨٦ في المائة من كتلة المجموعة الشمسية مركّز حاليًا في الشمس نفسها، وثلثا المادة المتبقية محجوزة في كوكب المشترى العملاق. وإذا جمعنا كل ما يتبقى (بما في ذلك الأرض) فإنه يكون أقل من [illegible] في المائة من كتلة المجموعة الشمسية ككل.

فإذا كان هذا التصور عن طريقة تشكل المجموعات الشمسية صحيحاً، فيجب أن تكون هناك أقراص من مادة الغبار حول كثير من النجوم الجديدة في درب اللبانة نفسه. ويصعب رصد هذه الأقراص : لأنها لا تضئ مثل النجوم، لكنها تتوهج باهتة إذا أصبحت ساخنة بسبب حرارة النجم في منتصفها، أو تتناثر لتعكس بعض ضوئها بعيداً في الفضاء. ورغم وجود دليل غير مباشر على وجود أقراص حول العديد من النجوم (مثل الطريقة التي يختفي بها بعض من ضوء النجم)، لم يتم حتى بضع سنوات مضت رصد سوى واحد من هذه الأقراص، حول نجم وليد يطلق عليه بيتا بكتوريس Beta Pictoris ، باستخدام ضوء مرئي عادي (تم التقاط صور فوتوغرافية للقرص أول مرة في ١٩٨٤). لكن علماء الفلك استطاعوا في ١٩٩٨ الحصول على صور لهذه الأقراص حول ثلاثة نجوم جديدة أخرى، باستخدام كاشفات تعمل بالأشعة تحت الحمراء.

والأشعة تحت الحمراء جزء من الطيف الكهرومغناطيسي أطوالها أكثر قليلاً من الضوء الأحمر. ولا تستطيع أعيننا رؤية الأشعة تحت الحمراء، لكننا نشعر بها على جلودنا مع انبعاث إشعاع ساخن من نار، أو مباشرة من مشع حراري مركزي. ويمكن رؤية جزء من نطاق الأشعة تحت الحمراء باستخدام كاميرات مناسبة (مثل تلك التي تستخدم نظم الرؤية الليلية، وتكون حساسة بالنسبة للإشعاع الحراري للأشعة تحت الحمراء). وتُثبت هذه الكاميرات في تلسكوبات بصرية. ويكون جزء آخر "مرئي" بالنسبة لنوع خاص من التلسكوبات الراديوية. وتم استخدام كلا التقنيتين للحصول على صور (أو خرائط) للأقراص حول اثنين من النجوم الأشد سطوعًا في السماء، هما فيجا [4] وفم الحوت [5]، وحول جرم أعطي اسم HRm6A.

وبصرف النظر عن موضوع وجود هذه الأقراص، فإن أهمية هذه الاكتشافات تكمن في أعمار هذه النجوم التي يتناولها البحث، حيث يصل عمر HRm6A إلى نحو عشرة ملايين سنة، وعمر Beta Pictoris إلى نحو ٣٥ مليون سنة، وفم الحوت إلى نحو ١٠٠ مليون سنة، وفيجا إلى نحو ٣٥٠ مليون سنة (ويقدر علماء الفلك أعمار النجوم بمقارنة المحاكاة بالكمبيوتر لكيفية عمل النجوم بمظاهر النجوم التي يرصدونها). ويصل عمر شمسنا إلى نحو ٤.٥ مليار سنة، وتشير الأدلة المستقاة من العمر الإشعاعي للصخور على الأرض، والعينات من القمر والنيازك (قطع صغيرة من الحطام الكوني تسقط على الأرض) إلى أن تكون الكوكب تم خلال نحو مائة مليون سنة من بداية "اشتعال" الشمس؛ لذلك فإن هذه الأقراص الأربعة لها من الأعمار ما يجعلها مجموعات تشبه مجموعتنا الشمسية، في مراحل مختلفة من التكوين.

ويضاف إلى ما سبق أن النجم فيجا اكتسب شهرة واسعة خارج دائرة علماء الفلك المحترفين، ويعود ذلك إلى فيلم "اتصال"؛ حيث كان هذا النجم هو مصدر الإشارات الآتية من جنس من الكائنات الفضائية الذكية، لكن فيجا في الواقع مكان لا

(٤) فيجا Vega : ألمع نجم في النسر الواقع (المترجم).

(٥) فم الحوت fomalhaut : هو النجم ألفا في كوكبة الحوت الجنوبي (المترجم).

يرجح إلى حد بعيد أن يكون مأوى لحياة ذكية؛ لأن مجموعته أصغر بكثير من أن تسمح لكائنات ذكية بالتطور فيها، ولأن كل ما يحدث في القرص المتكون من الغبار، ومن القطع الصغيرة من الحطام التي تضرب بعضها البعض وتتحطم فوق الكواكب الوليدة خلال عملية التشكل، قد يجعله مكانًا خطرًا جدًا إذا زارته أجناس مسافرة في الفضاء.

وكل هذه الأقراص أكثر ضخامة بكثير من مجموعتنا الشمسية. ويقيس علماء الفلك المتخصصين في الكواكب المسافات بوحدة فلكية AU، وهي المسافة المتوسطة من الأرض إلى الشمس (وهي نحو ١٥٠ مليون كيلومترًا). ويدور نبتون حول الشمس على مسافة ٣٠ وحدة فلكية – وهي أكثر بعدًا بمقدار ثلاثين ضعفًا من المسافة بيننا وبين الشمس – لذلك فإن الجزء الذي تحتله الكواكب في مجموعتنا الشمسية يصل قطره إلى نحو ٦٠ وحدة فلكية، وهو ما يعادل قطر مدار نبتون. وأقراص الغبار التي أُرى حول النجوم حديثة النشأة تكون أقطارها النموذجية بضع مئات من الوحدات الفلكية. لكن تجدر الإشارة إلى وجود منطقة داخلية خالية في كلا من HRm6A وفم الحوت، والحلقة الداخلية الخالية حول فم الحوت نحو ٦٠ وحدة فلكية، والفجوة في القرص حول HRm6A تصل إلى نحو ٧٠ وحدة فلكية. أما بيتا بكتوريس نفسه، وهو النموذج المثالي لأقراص النجوم، فإن قطر فجوته أصغر حيث يصل إلى نحو ٢٠ وحدة فلكية. وبالنسبة لكل الأقراص التي تم رصدها حتى الآن لا يبدو أن هناك بالقرب منها ما يحتوي على مادة أكثر مما تحتوي عليه الكواكب في المجموعة الشمسية إذا تم ضمها معًا. والغبار منتشر بشكل رقيق جدا. وكل ذلك يدل على أن تكوين الكواكب وراء خلو المناطق الداخلية في الأقراص، حيث تلتصق جزيئات الغبار ببعضها البعض وتتراكم لتكوين جرم أكبر. وقد تتشكل بعض المادة في الأجزاء الخارجية من الأقراص الممتدة التي تصبح مذنبات، لكن الجانب الأكبر في تشكيل الكواكب يعود إلى عملية العصف بالغبار في فضاء ما بين النجوم بواسطة حرارة النجوم حديثة النشأة في مراكز هذه الأقراص.

وكما هو الأمر بالنسبة لأقراص الغبار (والتي يتواصل اكتشاف المزيد منها، حتى أن أي قائمة قد أقدمها هنا ستكون محدودة وغير كاملة في الوقت الذي تقرأ فيه هذا

الكتاب)، فإن علماء الفلك قد توصلوا في التسعينيات إلى دلائل على وجود كواكب حول نجوم أخرى. وأغلب هذه الدلائل جاءت عن طريق أبحاث مثابرة حول طبيعة حركة نجوم قريبة منا نسبيًا عبر السماء. وفي أغلب الحالات، تم قياس هذه الحركات بالتغيرات الدورية في طيف الضوء القادم من النجم، والناجم عن الإزاحة القليلة للنجم إلى الخلف وإلى الأمام تحت تأثير جاذبية الكوكب الذي يدور حوله، ولا يمكننا أن نرى "ترنح" حركة النجم بشكل مباشر.

وعلى أية حال فقد قيل إنه تمت رؤية أحد هذه النجوم وهو يترنح من جانب إلى الجانب الآخر، بمقدار بالغ الصغر، وينظر إلى هذه الأقوال حاليًا على أنها كانت مبتسرة. ولإعطائك فكرة حول مدى صعوبة قياس هذه التغيرات، في الحالة النمطية للإزاحة المتواترة لنجم في السماء فإن الأمر يماثل قياس الإزاحة الجانبية التي تساوي سُمك شعرة إنسان واحدة منظور إليها من على بعد كيلومتر ونصف. وليس من المدهش أن الشكوك قد أحاطت بهذه الأقوال.

لكن لا توجد شكوك حول الترنحات النجمية التي تم الكشف عنها بواسطة منظار الطيف، الذي يحلل الضوء المنبعث من النجوم ويتعرف على البصمات الخاصة بالعناصر المختلفة بواسطة نمط الخطوط اللامعة والمظلمة التي تنتج في الطيف بسبب هذه العناصر (كما لو كان شفرة كونية مصفوفة). وتُفسر هذه الترنحات على أنها ناجمة عن جاذبية الكواكب العملاقة التي تدور حول النجوم - وفي أغلب الحالات التي تمت دراستها حتى الآن - يحتاج الأمر إلى كواكب أكثر ضخامة من المشتري لتفسير هذه الترنحات.

ويمكن تفسير خفوت بالغ الصغر في الضوء القادم من أحد هذه النجوم بمرور كوكب أكبر قليلاً من الأرض أمام النجم، وهو ما يوصف بأنه "مرور جسم سماوي صغير أو ظله عبر قرص سماوي آخر أكبر"، وهو يشبه كسوفًا مصغرًا. والنجم المعني هنا هو سي م. دراكونيس، وهو اسم يستحق التنويه على أمل أن يحسم مزيد من عمليات الرصد هذه الشكوك. ولقد تعددت الكواكب الموجودة خارج المجموعة الشمسية، والتي زعم علماء الفلك اكتشافها في النصف الثاني من عام ١٩٩٨، ورغم أن الخبراء

مازالوا يتجادلون حول صحة بعض هذه الاكتشافات، فليس من المرجح استبعاد وجودها جميعًا بطريقة ما.

وإذا كنا نكتب هذا الكلام في بداية ١٩٩٩، فقد يكون من المناسب القول إن لدينا دليل محدد على وجود كواكب أخرى، ولدينا رصد مباشر لأقراص الغبار حيث من المتوقع أن تتشكل الكواكب فيها. وهناك دليل جزئي جدير بالاهتمام، فنحن نعرف بواسطة منظار الطيف مما تتكون النجوم. فالنجوم الأكبر عمرًا، تلك التي تشكلت من المادة البدائية الناتجة مع ميلاد الكون في الانفجار العظيم، تتكون كلها تقريبًا من الهيدروجين والهليوم وتحتوي على كميات بالغة الضآلة من بضعة عناصر خفيفة أخرى. أما النجوم الأقل عمرًا، والأكثر حداثة فإنها تتكون من مادة تم إنتاجها جزئيًا داخل نجوم أخرى ثم أعيد تدويرها لتكوين نجوم جديدة (كما سنوضح لاحقًا)، وتحتوي على كمية أكبر من العناصر الأكثر ثقلاً. وبتجاهل متعال لدقائق علم الكيمياء، يجمع علماء الفلك عادة دون تمييز كل العناصر ما عدا الهيدروجين والهليوم في مجموعة واحدة تحت اسم "معادن" (بذلك فإن الأكسجين يعتبر بالنسبة لعالم الفلك من المعادن). وكل النجوم التي ثبت وجود كواكب تدور حولها غنية نسبيًا بالمعادن - وكأنها نجوم تكونت بكاملها من المادة التي أعيد تدويرها.

ولعلك تتساءل، كيف يمكن لكوكب، متكون من أشياء مثل الكربون والكبريت والسليكون والهيدروجين والهليوم، أن يتشكل من سحابة غازية تحتوي على هيدروجين وهليوم فقط؟ ويتضمن ذلك السؤال عن كيفية تكون النجوم الأوائل. وفي الواقع تعتبر أقراص الغبار التي تشكلت منها الكواكب غبار نجوم، وهو ناتج عن نشاط الأجيال السابقة من النجوم. وفي الواقع ها هنا تبدأ قصتي. فهي قصة أصل [illegible] في المائة من مادة النجوم التي عليها أن تُنتج الكواكب والبشر. وقد لا يكون هناك كوكب مثل الأرض، وقد لا تكون هناك حياة مثل حياتنا، إذا لم تكن هناك سحب غازية في الفضاء تضاف إليها هذه الكمية الضئيلة من الحطام المتكون من الغبار والناتج عن جيل سابق من الكواكب.

ولن أحاول تقديم شرح تفصيلي لكون قرص من الغبار مثل القرصين حول فم الحوت وبيتا بكتوريس، يصاحبه تكوين كوكب مثل الأرض؛ لأن علماء الفلك لم يعرفوا بعد على وجه الدقة كيف حدث ذلك، ولن أحاول بالتأكيد التوضيح التفصيلي لكيفية نشوء الحياة (رغم عدم مقاومتي لاستنتاج متواضع)، لكنني أنوي أن أقدم لك، باختصار، كيف تم إنتاج الهيدروجين والهليوم من الطاقة الخالصة خلال الانفجار العظيم نفسه. وسوف أقدم لك بمزيد من التفاصيل مصدر غبار النجوم الذي نشأت منه تلك الأقراص. ليس هناك هليوم في جسمك، ولا حاجة هناك للبحث داخل النجوم عن أصل الهيدروجين، لكنني سوف أحيطك علماً بالأصل النجمي لكل ذرة في كل العناصر الأخرى في جسمك. وبنظرة عامة فإن قصة ما نشير إليه على أنه "الحياة التي نعرفها" هي قصة الكون الذي نعيش فيه؛ لأن الحياة والكون متشابكان بشكل لا يمكن تجاهله.

الفصل الأول

الحياة والكون

يوضح هذا الكتاب العلاقة بين الحياة والكون، منذ الانفجار العظيم حتى ظهور مقدمات الحياة على سطح الأرض. إنها قصة كاملة متسقة الأجزاء، تحكي أصولنا الكونية التي تعود إلى غبار النجوم. وليس بالضرورة أن تكون هي كل قصة الحياة والكون. وقبل التنقيب عن التفاصيل أود أن أقدم باختصار بعض الأفكار الراهنة الأكثر إثارة التي إذا تأكدت صحتها فإنها ستؤدي إلى مزيد من التوسع في قصتنا هذه. و"المثير للاهتمام" لا يعني بالضرورة أنه "صحيح". لكن العلم يتقدم بتقديم تأملات منطقية. وفي كتاب يزعم أنه يقدم أفضل الأدلة العلمية المتاحة حول أصولنا، قد يكون إهمال مني إذا لم أوضح كيفية وصول العلم إلى هذه النتائج العميقة جداً؛ لذلك سأقدم أحد التأملات المهمة حول العلاقة بين الحياة والكون يستحق أن يكون وثيق الصلة بالقصة التي عليّ أن أحكيها، إضافة إلى أنه يركز على تطبيق المنهج العلمي.

وهذا التأمل هو بالأحرى فكرة قديمة تم إحياؤها من جديد ودخلت عليها تحسينات على ضوء المعارف الجديدة في علم الفلك. وهي مثيرة للاهتمام بشكل خاص لأنها توضح كيف يمكن للأفكار العلمية أن تكون مقبولة أو مرفوضة، ثم تعود من جديد مع ظهور اكتشافات جديدة ومع تغير الآراء. وكما هو الحال في العلم عادة، فإن أول شخص قدّم هذه الفكرة كان متقدماً على عصره. ففي ١٨٧١ فكّر وليام تومسون ملياً (وهو من أصبح يُعرف فيما بعد باسم لورد كلفن) في لغز أصل الحياة على الأرض علناً في خطابه الرئاسي للجمعية البريطانية. ولقد أورد تشابهاً بين الحياة على الأرض والحياة التي تظهر على جزيرة بركانية تشكلت حديثاً، قائلاً:

لا تتردد فى افتراض أن الهواء حمل بذرة وألقاها عليها، أو وصلت إليها البذرة محمولة على طوف - والاحتمال الأكبر، كما يجب أن ننظر إلى الأمر، أنه كان هناك ما لا يحصى من الأحجار النيزكية حاملة البذور تنتقل خلال الفضاء، ولو لم تكن هناك حياة على الأرض فى الوقت الراهن، فإن أحد هذه الأحجار الساقطة عليها، وهو ما نصفه تلقائيًا بأنه أسباب طبيعية، قد يجعل الأرض مغطاة بالنباتات الطبيعية.

وأقوال تومسون هذه ذات أهمية خاصة ؛ لأنها تعبير عن العصر الذى كان يعيش فيه - ولقد جاءت بعد بضع سنوات من نشر تشارلز داروين وألفريد راسل والاس لنظرية التطور عن طريق الانتخاب الطبيعي، حيث كان أهم ما فى الموضوع هو كيفية تكون الحياة على جزر معزولة، وكيف تطورت هناك إلى أنواع حية جديدة.

ويعكس المصدر "النيزكى" اهتمام طومسون الخاص بكيفية استمرار سخونة الشمس - وفى سعيه وراء فكرة أن الشمس تبث حرارة بأن تتقلص ببطء تحت تأثير وزنها، بحث طومسون نظريًا احتمال أن الشمس تحافظ على حرارتها بسقوط مطر دائم من حطام النيازك على سطحها. وكان من النادر أن تلقى أفكار طومسون حول أصل الحياة على الأرض أى تصديق، وإذا كان لا بد من ذكرها فإنها تستبعد فى أحسن الأحوال إلى ملحوظة هامشية فى التاريخ العلمى؛ حيث إنه لم يطور أبداً هذه الأفكار، وتركها مجرد تأملات.

وتبدأ القصة فى الواقع فى عام ١٩٠٧ مع اقتراح قدمه عالم الكيمياء السويدى سفانت أرهينياس، الذى كان بارعًا فى الكيمياء حتى أنه استحق جائزة نوبل للكيمياء فى ١٩٠٣، نظراً لعمله فى مجال التحليل الكهربائى. ولقى اتساع اهتماماته تقديراً بالغًا حيث كان فى عام ١٩٠٥ من أوائل من أبدوا اهتمامًا بإمكانية زيادة حرارة الغلاف الجوى للأرض بسبب تراكم ثانى أكسيد الكربون فى الجو (ظاهرة الاحتباس الحرارى) نتيجة حرق الوقود الأحفورى. وأدى اهتمامه بالأعمال التى تتناول الغلاف الجوى لكوكبنا مباشرة إلى أفكاره حول أصل الحياة على الأرض، بعد أن تأكد له

احتمال ارتفاع كائنات دقيقة (مثل البكتيريا) إلى الطبقات العليا من الجو، حيث يحتمل إفلاتها إلى الفضاء وخروجها من نطاق المجموعة الشمسية تحت تأثير ضغط الإشعاع الشمسى. ومن المعروف أن بعض الكائنات الدقيقة يمكنها البقاء خامدة عبر فترات زمنية طويلة جدا فى بيئة معادية (خاصة فى ظروف الجفاف)، لكنها تعود إلى الحياة النشطة من جديد عندما تتوافر احتياجاتها الأساسية (خاصة الماء). وكما يبرهن أرهينياس، فقد تعبر هذه الكائنات صحراء الفضاء ما بين النجوم فى هذه الحالة الخامدة، ثم تستعيد الحياة عند سقوطها على كوكب يشبه الأرض.

ولكن لماذا يحدث ذلك فى اتجاه واحد؟ فإذا كانت الأبواغ [٦] الحية القادمة من الأرض يمكنها بهذه الطريقة الانطلاق فى الفضاء، كما أوضح أرهينياس، فإن الأبواغ من كواكب أخرى، تلك التى تدور حول النجوم، يمكنها أيضًا الإفلات إلى الفضاء، وقد تعود أصل الحياة على الأرض من مثل هذه المواد المسافرة بين النجوم والتى دخلت إلى الغلاف الجوى للأرض عندما كان كوكبنا فى بداية نشأته. ويُطلق على هذه الفرضية حول نشأة الحياة على الأرض النشوء الأحيائى [٧] panspermia، "الحياة فى كل مكان"، وهى تتناسب بشكل أفضل التصور الذى كان لدى الناس عن الكون فى القرن العشرين. ولم يكن أرهينياس على معرفة بأى من أفكار تومسون، وعلى أى حال فإنه قدم فرضية قد تكون متطورة، محاولاً تفسير ليس فقط كيفية انتقال الحياة من الصخور الفضائية إلى كوكب ما، ولكن أيضًا كيفية خروجها من الكوكب إلى الفضاء؛ لذلك فإنه يستحق المكانة العالية التى يحتلها عادة فى تاريخ النشوء الأحيائى.

وفى ذلك الزمن كان يُنظر إلى ما نعرفه الآن بأنه درب اللبّانة (أو المجرة) على أنه كون كامل، وعرف علماء الفلك الآن أن النجوم ولدت وعاشت واندثرت كل على انفراد فى درب اللبّانة، وكان يُعتقد سابقًا أن "الكون" نفسه أبدى من الناحية الجوهرية ولا

(٦) البوغ spore : جسم تكاثرى صغير وحيد الخلية قادر على النمو ليصبح متعضيًا "كائنًا حيًا" جديداً تنتجه بشكل خاص بعض أنواع البكتيريا والفطر والطحالب والنباتات غير الزهرية. (المترجم)

(٧) النشوء الأحيائى panspermia ويسمى أيضًا biogenesis : وهو المبدأ القائل بأن الكائنات الحية تنشأ فقط من كائنات حية أخرى وليس من مادة غير حية. (المترجم)

يعمر . يمكنك تمثيل ذلك بالغابة القديمة، التي وُجدت منذ وقت سحيق، رغم أنه قد تم استبدال الأشجار عدة مرات. والسمة الأساسية في تصور الكون بهذه الطريقة أنه لا أصل له؛ لذلك لا يتم البحث في مشكلة بداية نشأة الكون. ومن ناحية أخرى من الواضح أنه كان هناك تساؤل حول كيفية نشأة الحياة على الأرض؛ حيث بدأت تقنيات النشاط الإشعاعي تضع تاريخاً لعمر الأرض عندما كان أرهينياس يفكر في حل لهذا اللغز. ونظراً لنقل مشكلة الحياة من الأرض إلى الكون الذي يُنظر إليه على أنه أبدي، "حل" أرهانياس اللغز بعدم وضعه في الاعتبار بالمرة. فإذا كان الكون أبدي ولا يتغير من الناحية الأساسية، رغم مرور أجيال من النجوم بدورات حياتها في الكون، فيبدو من المنطقي القول بأن الحياة كانت موجودة دائمًا في الكون، وانتشرت من الكواكب القديمة إلى الكواكب الجديدة كجزء من دورة تتالي الأجيال. وفي كون قديم لا نهائي، حتى لو ظهرت الحياة من باب الصدفة، فلا بد أنه كان هناك زمن لا نهائي متاح لإنجاز المطلوب، ثم زمن غير محدود آخر لانتشار الحياة من الكوكب الذي نشأت فيه لكي تعمر الكون كله. كان هذا المنطق مقبولاً تماماً لاتساقه مع ما كان معروف عن الكون في العقد الأول من القرن العشرين.

ورغم أن هذه الفكرة معقولة، لم يكن يُنظر إليها بالتقدير الكافي. وحيث إن معرفتنا بالنجوم ودرب اللبّانة والكون واكبه تطور ضخم خلال النصف الثاني من القرن (وهي قصة يتم تقديمها بالتفصيل في صلب هذا الكتاب)، كان أغلب المفكرين في مشكلة أصل الحياة منزعجين من مشكلة كيفية نشوء الجزيئات العضوية المعقدة من مواد كيميائية بسيطة مثل الميثان والنشادر في الأحوال التي يُعتقد أنها كانت موجودة على الأرض في تاريخها المبكر. وكما سنرى، لم يبدأ علم الفلك الراديوي في الكشف عن ثراء كيمياء ما بين النجوم إلا في أواخر الستينيات.

وشهدت الستينيات أيضًا ظهور الاهتمام من جديد بفكرة النشوء الأحيائي ، لكن ذلك قد حدث في الواقع قبل اكتشاف جزيئات عضوية معقدة في الفضاء. ويعود جزء من دوافع هذا الاهتمام إلى إطلاق بالونات تحمل وحدات من التجهيزات الآلية إلى

الارتفاعات الشاهقة في طبقة الإستراتوسفير[٨] ، والتي كشفت أن الكائنات الدقيقة توجد بالفعل في الطبقة العليا من الهواء. لكن الحسابات الأساسية أنجزها عالم الفلك الأمريكي كارل ساجان، باشتراكه مع الروسي أوسيف شكلوفسكي في وضع الكتاب المعلم "الحياة الذكية في الكون" الذي صدرت طبعته الأولى في ١٩٦٦ (لكنه مازال يستحق القراءة). وبدلاً من الاكتفاء بالتفكير في مصير هذه الكائنات الدقيقة، حسب ساجان عمليًا تأثير الإشعاع الشمسي على جزيئات مختلفة الأحجام (وهو ما لم يكن في استطاعة أرهينياس عمله بالطبع، حيث لم تكن هناك معلومات كافية في بداية السبعينيات حول الشمس وبيئة ما بين الكواكب).

وحيث إن الجاذبية تميل إلى سحب الجزيئات في اتجاه الشمس، ولأن ضغط الإشعاع الذي يدفعها يعتبر ضعيفًا، ينتج عن ذلك أن الجزيئات بالغة الصغر هي التي يمكنها فقط أن تفلت بعيداً عن مدار الأرض - أي الميكروبات التي لا يتجاوز قطرها ... مايكرو متر (نصف جزء من مليون من المتر). ويثير ذلك الأمر الاهتمام من جانبين: الأول وجود كائنات دقيقة بهذا الحجم، والثاني لأنه تم رصد جزيئات غبار بهذا الحجم في السحب ما بين النجوم. ويمكن لهذه الجزيئات البكتيرية القادمة من الأرض أن تخترق مدار المريخ خلال بضعة أسابيع، والمشتري في عدة أشهر، وتفلت من المجموعة الشمسية في عدة سنوات، وقد تختلط بسحابة بين النجوم خلال مليون سنة. ورغم أن فكرة النشوء الأحيائي الأصلية قد درست الكائنات الدقيقة التي انتقلت إلى كواكب حديثة المنشأ، يمكن لمزيد من التفسيرات الحديثة أن ترى أنها أصبحت جزءاً من المادة التي تنشأ عنها الكواكب حديثة التشكل. ولكن هناك عقبة غير متوقعة وقد سارع ساجان إلى تحديدها.

فبمجرد انطلاق الكائنات الدقيقة من الغلاف الجوي للأرض، تتعرض للأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس وتتعرض أيضًا إلى جزيئات، مثل البروتونات والإلكترونات، التي تشكل جزءاً من الرياح الشمسية (أشعة شمسية كونية). وقد تموت معظم البكتيريا القادرة على المقاومة حتى تلك الموجودة على الأرض في الوقت الراهن.

(٨) ستراتوسفير stratosphere الغلاف الزمهريري: الجزء العلوي من الغلاف الجوي وهو أعلى من الطبقة السفلى وأسفل الطبقة العليا . (المترجم)

بسبب الأشعة فوق البنفسجية بعد يوم واحد من مغادرتها الأرض، وحتى لو كان هناك كائن لديه مناعة ضد الأشعة فوق البنفسجية؛ فقد تقتله الأشعة الكونية قبل مغادرته المجموعة الشمسية.

وهناك مشكلة أخرى، على الأقل فيما يتعلق بالفكرة الأصلية حول النشوء الأحيائى. فإذا كان حجم الكائنات الدقيقة التى خرجت من مدار الأرض نحو ٠,٥ ميكرو متر، فمن المؤكد أنه لا شيء بهذا الحجم يمكنه أن يسقط على سطح الأرض حديثة المنشأ، حتى لو كان قد أفلت من كوكب مماثل يوجد فى مكان ما من الكون. ودفعت هذه المشكلة ساجان وشكلوفسكى إلى دراسة احتمال وصول بذور الحياة إلى كواكب بعيدة عن النجم الذى تنتمى إليه - مثل المشترى وزحل فى مجموعتنا الشمسية. ولا ريب أن ذلك يستدعى سؤالاً حول كيفية ظهور الحياة على الأرض فى الأصل، وعلى أى حال فإن هذه المشكلة لا تظهر إذا نظرنا إلى الكائنات الدقيقة على أنها قد أصبحت مدمجة فى السحب بين النجوم التى تشكلت منها المجموعات الكوكبية الجديدة؛ لأن هذه الكائنات يمكنها فى هذه الحالة أن تصل إلى الكواكب الجديدة من خلال اصطدام المذنبات بها، وهذا جزء من العملية الطبيعية لتكوين الكواكب التى أقدمها فى الفصل التاسع .

وكان ساجان بوصفه عالم فلك يعتقد فى بداية السبعينيات أن فكرة النشوء الأحيائى ليست صحيحة؛ لأن بيئة الفضاء معادية تماماً لمثل هذا النوع من الأحياء التى قد تفلت من الأرض فى الوقت الراهن. ولكن فى الوقت نفسه تقريباً كان عالم البيولوجيا البريطانى البارز فرانسيس كريك [٩]، قد أصبح مقتنعاً بأن الدليل الفلكى والجيولوجى يشير إلى أنه لم يكن هناك وقت كافٍ للحياة لكى تتطور بشكل عشوائى على الأرض نفسها. وهناك دليل جيولوجى مباشر على أن وجود الحياة على الأرض يعود إلى أقل من ٦٠٠ مليون سنة بعد نشأة الكوكب، ولا يرى علماء البيولوجيا مثل كريك أية وسيلة لظهور الحياة من خليط من المواد الكيميائية البسيطة خلال ذلك الزمن، وبينما كان علماء الفلك يرفضون فكرة النشوء الأحيائى لأسباب بيولوجية، كان علماء

(٩) حصل كريك على جائزة نوبل عام ١٩٦٢ فى الفسيولوجيا والطب مشاركة مع جيمس واطسون وموريس ولكنز لاكتشافهم بنية الدنا.

البيولوجيا على وشك دعم هذه الفكرة لأسباب فلكية. ولقد أحدث كريك مع الأمريكى ليسلى أورجيل تغييراً فى الموضوع أطلق عليه "النشوء الأحيائى المباشر"، الذى يقول إن بذور الحياة وُجدت على الأرض بطريقة متعمدة، على هيئة كائنات دقيقة (البكتيريا مثلاً، نفسها) التى انتقلت خلال الفضاء داخل مركبة فضائية من خارج الأرض، لديها وقاية ضد الإشعاع الكونى.

ولا بد أن ما تم كان محاولة متعمدة لبذر الحياة فى الأرض بشكل خاص، وسيكون لدينا فى القريب العاجل تقنية معاصرة لإرسال مسابر صغيرة غير مأهولة فى اتجاهات شبه عشوائية تحمل بكتيريا لإسقاطها على أى كوكب تصطدم به. ويبدو ذلك وسيلة ذكية أدت إلى بدء الحياة على الأرض، لكنه ربما كان خطوة أفضل من الاقتراح الذى قدمه عالم الفلك جاداً وهو يقصد الهزل، أن كل أشكال الحياة على الأرض قد تكون هبطت من فضلات عضوية تركها على الكوكب بعض الكائنات الفضائية الذين توقفوا خلال نزهة!

ومع ذلك فقد تأرجح البندول من جديد منذ السبعينيات؛ حيث شهد موضوع النشوء الأحيائى تغيراً جديداً بالقول بأنه رغم مشكلة الإشعاع يمكن للكائنات الدقيقة فى نهاية الأمر أن تفلت بالطرائق الطبيعية من كوكب مثل الأرض، وتعبر فضاء ما بين النجوم لتنقل عدوى الحياة إلى كواكب أخرى. وتبنى جيف سيكتير من جامعة ولاية واشنطن، الذى كان يعمل مع بول ويسون وجيمس ليبوك من جامعة ووترلو فى كندا، وجهة نظر أخرى بالنسبة لمشكلة كيفية نجاة الأبواغ الفضائية. لقد وضعوا فى حساباتهم الطريقة التى يتغير بها نجم مثل الشمس مع تقدمه فى العمر وتحوله إلى ما يسمى بالعملاق الأحمر.

وكانت خطوتهم الأولى تخيل اكتساب الكائنات الحية الدقيقة الحية (أو فى حالة سبات) حماية بعد أن أصبحت مطمورة فى حبيبات الغبار. ويقدم هذا الرأى حلاً جزئياً فقط لمشكلة الإشعاع، وبالإضافة إلى ذلك يجعل الجزيئات أكثر ثقلاً، لذلك يكون من الصعب أمامها أن تنطلق من المجموعة الشمسية. ولكن عندما تصبح الشمس عملاقاً أحمر فإن كثافة الأشعة فوق البنفسجية الصادرة عن سطحها ستكون أقل بكثير، ويزداد سطوعها مما يؤدى بدوره إلى زيادة ضغط الإشعاع الذى يدفع الحبيبات

الصغيرة خارج مدار الأرض. وكما سنرى فإن العمالقة الحمر تبث كمية كبيرة من المادة فى الفضاء، ويمكن لمادة حاملة الحياة على كوكب فى مدار حول العملاق الأحمر أن تندمج فى هذه المادة.

ونقول مرة أخرى إنه من السهل إدراك كيفية وصول مادة حية إلى سحب ما بين النجوم حيث تتشكل مجموعات كوكبية جديدة. ولا يشترط حتى أن تكون هذه المادة حية (أو فى حالة سبات). ولقد أوضح سيكير وزملاؤه فى ١٩٩٦ شيئًا يبدو أن الآخرين جميعًا نسوه: أنه حتى فيما يتعلق بما يطلقون عليه مادة بيولوجية "خاملة"، على هيئة شظايا جزيئات مثل الدنا، فإن بقايا المادة التى كانت حية من قبل تتكسر منفصلة بواسطة الإشعاع الكونى ويمكنها، إذا وصلت إلى كوكب مناسب، أن "تعزز فرصة تطور الحياة فى هذا الكوكب، وقد يفسر ذلك التطور (واضح) السرعة للحياة المبكرة على الأرض". ومن جانب آخر نقول من جديد إن سيكير وزملاءه، مثلهم مثل كل الآخرين الذين تبنوا فكرة النشوء الأحيائى بأشكاله المختلفة، كانوا يفكرون فيما يخص المادة البيولوجية التى تسقط على كوكب موجود من قبل، وفاتتهم فكرة أن من الأكثر سهولة للمادة البيولوجية أن تختلط بالمادة الخام التى تشكلت منها الكواكب من البداية.

والأخبار الجيدة تبعًا لوجهة نظرهم هى؛ حيث إن نجمًا مثل الشمس يصبح عملاقًا أحمر فقط بعد أن يقضى نحو عشرة مليارات سنة كنجم مستقر على الحالة نفسها التى نراه فى الوقت الراهن، فإن هناك متسعًا من الوقت لكل تتطور الحياة على كوكب يدور حول هذا النجم. ومن المحتمل أن ظهور الحياة للمرة الأولى قد استغرق بالفعل أكثر بكثير من ٦٠٠ مليون سنة، ثم تولى النشوء الأحيائى ما تبقى. والجانب السيئ من الموضوع أنه لو كان الأمر يحتاج إلى مثل هذه الفترة الزمنية الطويلة لكى تظهر الحياة للمرة الأولى، فلا بد أن ذلك وقع فى كوكب قد تشكل منذ فترة بالغة الطول قبل تشكل المجموعة الشمسية. وحيث إن المجموعة الشمسية نشأت منذ نحو ٤,٥ مليار سنة مضت، قد يبدو أن هذا الرأى يقول إن كل عملية ظهور الحياة، مع إتاحة الوقت الكافى للنشوء الأحيائى؛ لكى ينثر المادة البيولوجية بعد أى يصير النجم الأصلى عملاقاً أحمر، قد استغرقت وقتًا أطول بكثير. وحتى لو كان النجم الأصلى أكثر ضخامة بقليل من الشمس (مما قد يعنى أنه يقطع دورة حياته أسرع قليلاً من

الشمس)، فما زال علينا أن ننتظر مليارات السنوات حتى يصبح عملاقًا أحمر؛ لأن أهم ما فى الموضوع هو الحاجة إلى هذه المليارات من السنوات حتى تتطور أول كائنات حية. ولك أن تقول إنه لا سبيل لأن نجد ما نبحث عنه فى نجم له ثلاثة أضعاف كتلة الشمس، الذى يقضى عمرًا لا يتجاوز ٥٠٠ مليون سنة؛ لأنه لو نشأت الحياة فى مثل هذا النجم فى هذه الفترة الزمنية القصيرة، فيمكنها أن تفعل الشىء نفسه على الأرض فى مئات الملايين القليلة الأولى من وجود كوكبنا.

من هنا فإن الجدل حول "النشوء الأحيائى للعملاق الأحمر" دفع إلى الخلف بعملية تكوين المجموعة الكوكبية التى يمكن أن تظهر فيه الحياة إلى ما وراء ١٠ مليارات سنة، وهو قريب إلى درجة غير مناسبة من أفضل التقديرات لعمر الكون، ولا يسمح سوى بوقت قليل للمجموعات الكوكبية؛ لكى تتشكل بعد الانفجار العظيم. وفى هذا الوقت بالغ الابتعاد لم يكن لدى النجوم سوى فرصة صغيرة لتخليق العناصر الأكثر ثقلاً، ويصبح الأمر مجرد حدس حول ما إذا كان هناك ما يكفى من المادة الخام المناسبة المتوافرة على الكواكب المبكرة؛ لكى تتيح المواد الخام للحياة التى نعرفها. ولا بد أن تكون الحياة هى تلك التى نعرفها؛ لأن كل المناقشة تدور حول أننا جئنا مباشرة من هذه الكائنات الحية الأولى.

ومن وجهة نظرى تعتبر نقطة الانطلاق أن النشوء الأحيائى يمكن أن يكون صحيحًا، ولكن لأسباب سوف أشرحها فى هذا الكتاب، ليس هناك حاجة للنشوء الأحيائى "الطبيعى" أو "المباشر" لتفسير وجود الحياة على الأرض. وتبدو كلا الفكرتين أكثر افتعالاً من القول بأنه تم بذر جزيئات عضوية معقدة فى الأرض حديثة النشأة، تلك الجزيئات التى ظهرت من خلال عمليات كيميائية طبيعية حدثت فى سحابة بين النجوم، والتى تكونت منها المجموعة الشمسية ، وهى فكرة تبناها ساجان فى نهاية الستينيات، والتى ظهرت فى عمل له مع كريستوفر تشيبا. وإذا كان علىَّ أن أقوم بمزيد من التخمين، قد أقول إن الكيمياء المعقدة لسحب ما بين النجوم كانت وراء إنتاج جزيئات حية أصيلة. وبالنسبة لى فإن القول بأن تلك الجزيئات قد تطورت فوق كواكب أخرى ثم انطلقت فى الفضاء لتختلط بتلك السحب ما بين النجوم هو مجرد التقدم بخطوة بطيئة فى الحسابات. وفى نهاية التسعينيات أدت التجارب فى المختبر، حيث

تمت معالجة أنواع من الجزيئات الموجودة فى سحب ما بين النجوم فى وقتنا الراهن، بالأشعة فوق البنفسجية، إلى تكون تشكيلة كاملة من الجزيئات العضوية التى حدث لها هى نفسها مزيد من التفاعل لإنتاج أحماض أمينية وجزيئات كيميائية حيوية أخرى. دعك من كل ما حدث على الأرض عندما كان عمرها نحو ٦٠٠ مليون سنة، فسترى أن كل المشاكل التى أزعجت فرانسيس كريك فى السبعينيات قد اختفت. وكما قال عالم الفلك دافيد يوهل، إن "سيادة الأنواع العضوية (فى سحب ما بين النجوم) والتشابه بينها وبين المنتجات التى تم الحصول عليها فى التخليق (فى المختبر) للأحماض الأمينية خلال دراسة أصل الحياة، يقول بالتناظر الكبير بين سحب ما بين النجوم والكيمياء ما قبل الحيوية"[١٠].

ورغم أننى لا أنظر إلى النشوء الأحيائى كما لو كان تفسيراً مرجحاً لأصولنا، لا شك أننا سوف يكون لدينا فى المستقبل القريب قدرة على بذر الحياة فى الكواكب الأخرى، مما يخلق مشاكل أخلاقية مثيرة للاهتمام (وهو ما يخرج عن نطاق هذا الكتاب). والمعنى الذى أتمنى أن يكون قد وصلك من تقديمى المختصر لتاريخ النشوء الأحيائى هو مدى التقدم الذى تم إحرازه فى القرن الماضى. وبطريقة أو بأخرى، فإن الفكرة الأصلية للنشوء الأحيائى كانت مخيبة للآمال؛ لأنه ليس هناك من يعرف كيف يمكن للحياة أن تنشأ، وكان التخمين أنها كانت موجودة دائماً، ثم انتشرت ببساطة من مكان إلى آخر فى الكون. ومازلنا لا نعرف بالضبط كيف بدأت الحياة – ولم ير أحد حتى الآن خليطاً من المواد الكيميائية يصير حياً فى أنبوبة اختبار. ولكننا، وهذا لا يشبه حال أرهينياس، نعرف فعلاً – وعلى وجه الدقة – ما هو خليط المواد الكيميائية المطلوب لوجود الحياة التى نعرفها ونعرف بالضبط من أين أتت هذه المواد الكيميائية – كمنتج طبيعى ثانوى لعمليات نشأة وتطور النجوم. وهذه هى القصة التى سوف أحكيها لك، مع البدء بأساسيات طبيعة الحياة نفسها.

(١٠) مقتبس من ستيفن ج. ديك "الحياة فى العوالم الأخرى" (CUP 1998)

الفصل الثانى

الحياة كما نعرفها

ما الحياة؟ لأننا أحياء ونعيش على سطح الأرض، يبدو لنا من الطبيعى تماماً، دون الحاجة إلى التفكير، أن تكون هناك أشكال من الحياة مثلنا على كواكب أخرى يشبه الأرض. لكن عندما تفكر فى هذا الأمر وخاصة عندما تقارن بين الأحوال السائدة على الأرض بتلك الموجودة على الكواكب الأخرى فى المجموعة الشمسية، يبدو لك فى البداية أنه من المدهش جداً أن يوجد من الأصل هذا التجميع الخاص من المواد الكيميائية التى يتكون منها الإنسان، وأن يوجد كوكب مثل الأرض يمكن أن يتطور عليه هذه المواد الكيميائية – مركبات العناصر – إلى نباتات مثل الفاوانيا[١١] وكائنات مثل البشر.

ومن المؤكد أن ظهور الحياة أمر بالغ الأهمية حتى لو كان الفكر لا يحيط به. وللوهلة الأولى قد يكون الانطباع غير الفكرى صحيحاً. وقد يكون من الطبيعى بالفعل أن يوجد حياة مثل حياتنا على كوكب يشبه الأرض. وكلما فكرنا بمزيد من العمق فى طبيعة الحياة نفسها، كلما وجدنا علاقات أكثر عمقاً بيننا وبين الكون الكبير. وهذا واضح على وجه الخصوص إذا بدأت من القاع إلى أعلى، ونظرت إلى الحياة بمستلزمات وحدات البناء الكيميائية الأكثر بساطة، أى العناصر.

(١١) الفاوانيا، عود الصليب peony: نبات ذو زهرات كبيرة حمراء أو قرنفلية أو بيضاء. (المترجم)

وبالطبع لا تقتصر الحياة على مكوناتها الكيميائية. فإذا جمعت كل المواد الكيميائية التى من شأنها أن تصبح إنساناً (أو نبات فاوانيا) على هيئة كومة، لن تحصل على كائن حى، ولن تحصل حتى على كومة من المواد الكيميائية. وأحد السمات المميزة للحياة أنها تمد بفيض من الطاقة وتستخدم هذه الطاقة فى إنتاج أشياء معقدة من أخرى بسيطة. وفى حالة الحياة على سطح الأرض، فإن فيض الطاقة يأتى من الشمس، ويتم استخدام طاقتها الشمسية فى إنتاج الكيمياء المعقدة للحياة من الكيمياء البسيطة للعناصر غير الحية. لكن هناك أيضاً كائنات حية تعيش فى العمق تحت سطح المحيطات، حيث لا تشعر أبداً بحرارة الشمس. وفى هذه الحالة يأتى فيض الطاقة من فتحات فى أرضية المحيط، تتدفق منها طاقة الحرارة الآتية من باطن الأرض فى البيئة البحرية المحلية.

وهذا مثال واحد للقاعدة الطبيعية الأكثر اتساعاً: أن الأشياء المعقدة (وليس بالضرورة أن تكون حية) توجد حيث يمكنها الحصول على فيض من الطاقة. وعندما تفيض الطاقة بالطريقة المناسبة، تنظم المنظومات البسيطة نفسها تلقائياً فى أنماط مشوقة. ويطلق على هذه العملية التنظيم الذاتى، وتقع فى صميم دراسة التعقد – وهو أحد المجالات الأكثر تشويقاً والأكثر إثارة للاهتمام فى الأبحاث العلمية فى بداية القرن الواحد والعشرين. ونجد فى الواقع مثالاً بسيطاً (غير حى) للتنظيم الذاتى عندما يتم تسخين وعاء قليل العمق ملئ بسائل زيتى، حيث تبدأ الحرارة فى الانتقال إلى أعلى بالتوصيل ولا يتحرك السائل. ثم مع ارتفاع سخونة السائل تبدأ الطبقة السفلية للسائل فى الارتفاع بواسطة الحمل، بينما يهبط سطح السائل الأكثر برودة ليحل محل الطبقة السفلية. ويتسم الحمل فى البداية بالفوضى، ولكن مع وجود مصدر حرارى معتدل أسفل الإناء، يمكن للحمل أن يستقر على هيئة إطار جميل من الخلايا المسدسة الشكل، مثل شريحة فى قرص عسل نحل، بينما السائل الساخن يصعد إلى أعلى جوانب الخلايا ويهبط السائل البارد فى منتصف كل خلية.

والحياة أكثر تعقيداً من ذلك، لكنها تعتمد أيضاً على فيض الطاقة خلال المنظومة؛ أى خلال الخلية الحية على المستوى الأولى. وتتكاثر الخلايا الحية بإنتاج خلايا جديدة، لكن السؤال الأكبر فى البيولوجيا مازال يدور حول مصدر أول كائنات حية. ولدى علماء

البيولوجيا الآن فكرة واضحة حول الحد الأدنى من التعقد المطلوب لإنتاج خلية حية – بعض من الدنا وبعض من الرنا وبعض من البروتين وغشاء لضم كل شىء مع بعضه البعض ومصدر طعام للإمداد بالطاقة. وبمجرد ظهور "أدنى بكتيريا" بهذه الطريقة على الأرض (دعك من مشكلة ما إذا كانت قد جاءت من الفضاء الخارجى أو ظهرت على سطح الأرض نفسها)، أصبح لاستمرار التطور أهمية لإضافة مزيد من التعقد لإنتاج خلايا أكثر كفاءة فى استخدام الطاقة، ولديها قدرة أفضل على التكاثر. لكن هذا الأمر، مثله مثل أصل أول أدنى بكتيريا يخرج عن نطاق كتابنا الحالى. حيث إننى هنا مهتم هنا بأصل المقومات المادية للحياة – لكننى لا أريد أن أعطى انطباعاً بأننى اختزالى[١٢] إلى درجة التفكير بأن ما أقدمه هو كل ما فى القصة!

ومقومات الحياة هذه هى مجموعة ضمن مجموعة أكبر من العناصر الكيميائية بل هى بالأحرى مجموعة محدودة ضمن مجموعة أكبر، وكما تعلمنا فى المدرسة جميعاً فإن العنصر هو المادة الأكثر بساطة التى يمكن أن يكون لها دور فى التفاعل الكيميائى، ولا يمكن تجزىء العنصر إلى ما هو أبسط منه، أو تحويله إلى عنصر آخر، بالطرائق الكيميائية.

ويوجد على الأرض بشكل طبيعى نحو تسعين نوع من العناصر، كل منها يحتوى على نوع واحد من الذرات – والذرة هى أصغر وحدة موجودة فى العنصر. ويمكن للعناصر (وبالأحرى الذرات) أن تتحد مع بعضها البعض بطرائق معينة لكى تشكل مركبات، مثل جزيئات الماء. ويحتوى كل جزئ فى الماء مثلاً على ذرتين من عنصر الهيدروجين وذرة من عنصر الأكسجين، لذلك فإن صيغته تكتب على هيئة H_2O. إلى هنا والأمر مألوف، لكن أول مفاجأة تنتظرنا، فرغم أن بعض العناصر التسعين موجود بشكل طبيعى على الأرض فإن نوعين فقط من الذرات هما اللذان يشيعان فى الكون المرئى. ويهيمن على كيمياء الحياة نفسها أربعة عناصر فقط.

(١٢) الاختزالية reductionism : ميل أو محاولة لتفسير الظواهر أو الأبنية المعقدة بمبادئ بسيطة جداً مع التأكيد على أن العمليات الحيوية أو العقلية هى نتيجة القوانين الكيميائية والفيزيائية . (المترجم)

ومن حيث الكتلة فإن أطول النجوم عمراً يتكون من نحو ٧٥ فى المائة من الهيدروجين وجزء أقل من ٢٥ فى المائة من الهليوم، مع مجرد نتف من العناصر الأخرى. والكون المرئى فى أغلبه من الهيدروجين والهليوم. لكننا مصنوعين من مركبات مختلفة من العناصر من المادة البدائية التى تمت معالجتها فى داخل النجوم وتكونت منها العناصر الأكثر ثقلاً. ورغم أن عملية المعالجة هذه (وإعادة المعالجة) للمادة النجمية استمرت تحدث لنحو ١٢ مليار سنة، مازالت المجموعة الشمسية تحت هيمنة الهيدروجين والهليوم. وليس ذلك واضحاً بالنسبة لنا لأن أغلب الهيدروجين والهليوم محجوز ببساطة فى الشمس نفسها، بينما الكوكب الذى نعيش عليه - الأرض - هو جزء صغير من البقايا يدور حول الشمس.

وقياس مدى وفرة العناصر من حيث الكتلة (وهو يماثل الوزن لمثل هذه الأغراض) هو مجرد جزء من القصة؛ لأن ذرات العناصر المختلفة، من جانب آخر، لها كتل مختلفة (ويحدث أحياناً أنه حتى ذرات العنصر الواحد يكون لها كتل مختلفة بعض الشىء عن بعضها البعض، لكننى للهدف الراهن لا أشير إلا إلى الشكل الشائع لكل عنصر). ولكل ذرة هليوم، مثلاً، أربعة أضعاف كتلة كل ذرة هيدروجين؛ لذلك ففى حالة التعامل مع كل ذرة (أو النواة الذرية) كجزىء منفرد، تكون الشمس متكونة من ٩٠,٨ فى المائة من الهيدروجين و٩,١ فى المائة من الهليوم، و٠,١ فى المائة من العناصر الأخرى معاً وهذا يشبه إلى حد بعيد التركيب الذى تم الحصول عليه بواسطة منظار الطيف للنجوم الأخرى التى لها عمر الشمس تقريباً.

لكننا نعيش فى الجزء الكوكبى من المجموعة الشمسية الذى تشكل من قرص الغبار حول النجم حديث النشأة. واتجهت المادة الخام الأكثر خفة فى القرص إلى الانطلاق بعيداً فى فضاء ما بين النجوم تحت تأثير حرارة النجم الجديد، وكان الهيدروجين والهليوم هما العنصران الأكثر خفة من كل العناصر؛ لذلك فإن نسب العناصر الأكثر ثقلاً هى الأعلى بعض الشىء فى الجزء الكوكبى من المجموعة الشمسية مقارنة بالشمس نفسها - ليس بسبب وجود مادة أكثر ثقلاً ولكن لقلة المادة الخفيفة. ومن حيث الكتلة، بالنظر إلى المجموعة الشمسية فى مجملها، يصل نصيب الهيدروجين إلى ٧٠,١٣ فى المائة من الإجمالى والهليوم إلى ٢٧,٨٧ فى المائة،

والأكسجين، وهو ثالث العناصر الشائعة من ناحية الكتلة، يصل إلى ٠,٩١ فى المائة من الإجمالى. ورغم هيمنة الهيدروجين والهليوم، فإن حقيقة أن الأكسجين هو العنصر الثالث الأكثر شيوعاً من ناحية الكتلة فى المجموعة الشمس تعتبر فعلاً اكتشاف مهم، لأن الأكسجين يلعب دوراً مهماً فى عملية الحياة التى نعرفها وأهميته من الوضوح بحيث لا أحتاج حتى إلى ذكرها. وإذا تجاهلنا الهيدروجين والهليوم للحظة، وركزنا على ١ فى المائة من كتلة المجموعة الشمسية التى تمثل العناصر الأخرى، فإن الموقف يبدو أكثر إثارة للاهتمام.

وعدد هذه العناصر صغير جداً حتى أنه من المناسب فى هذه الحالة أن نعود إلى الطريقة مرة أخرى لحساب عدد الجسيمات وليس الكتل. وفى الجزء الذى نعيش فيه فى [illegible] (وفى الكون على نطاق واسع)، فإن الكبريت يأتى فى المرتبة العاشرة بين العناصر الأكثر شيوعاً، إذا حسبناه بهذه الطريقة. ولكل ذرتين كبريت توجد ٣ ذرات حديد، و٤ لكل من الماغنسيوم والنيون، و٥ ذرات للسليكون، و٩ ذرات للنتروجين، و٤٠ ذرة للكربون، و٧٠ ذرة للأكسجين (وكل هذه مجرد كميات صغيرة جداً إذا قورنت بآلاف الذرات للهليوم وعشرات الآلاف من الذرات للهيدروجين لكل بضع ذرات من الكبريت أو الحديد) (١٣). وبجانب عناصر القمة العشرة هذه هناك خمسة عناصر أخرى فقط (ألمنيوم، أرجون، كالسيوم، نيكل، وصوديوم) التى تتراوح وفرتها بين ١٠ و[illegible] فى المائة من وفرة الكبريت. وما عدا ذلك فأكثر ندرة لسبب سوف أوضحه لاحقاً. فالذهب مثلاً ذو ندرة حتى أنه يوجد منه ٣ ذرات لكل ١٠ مليون ذرة كبريت، وهذا أحد أسباب القيمة العالية للذهب.

والآن يمكننا أن نسأل: مما نتكون؟ ما "الحياة كما نعرفها" بالمصطلحات [illegible]؟ وهنا لا يمكنك أن تتوقع وجود هليوم فى جسمك؛ لأن الهليوم غاز لا يتفاعل

١٢- وفيما يخص تمييز هذه الكميات بالنسبة للأعداد الكلية، فإن الكتب المختلفة تعطى أرقاماً مختلفة [illegible]. وإذا لم تتم الإشارة إلى ما يخالف ذلك فى هذا الكتاب، فإن الأرقام الواردة فيه تعتبر مؤشراً [illegible] دقيقة. وهذه المجموعة من الأرقام مأخوذة من "الكون" لوليام كوفمان. والأكثر أهمية لا يتعلق بما [illegible] ٢ أو ٣ ذرات حديد لكل ذرة كبريت، ولكن بأنه على وجه التقريب وجود الكربون بمقدار عشرة [illegible] مقارنة بالنيون، ووجود الأكسجين بضعف الكربون.

بدرجة كافية – إلى درجة أنه يُوصف بأنه غاز خامل. فليس له دور فى التفاعلات الكيميائية ولا يدخل فى مركب كيميائى مع أى شىء، وهو أيضاً غاز خفيف جداً، أخف من أى شىء آخر ما عدا الهيدروجين. وبسبب جمعه بين الخمول (وبالتالى عدم الاشتعال) والخفة فإنه مطلوب جدا كغاز يساعد على رفع المناطيد. وأغلب إجمالى كمية الهليوم التى كانت فى الجزء الذى نوجد فيه فى قرص الغبار عندما تشكلت الأرض هرب إلى الفضاء، لأنه عجز عن تكوين مركبات تجعله مرتبطًا بجرم الأرض. ورغم أن الهيدروجين أكثر خفة من الهليوم، فإنه يسارع إلى تكوين مركبات، وهذا واضح تماماً فى المحيطات التى تغطى أغلب سطح الأرض، حيث يتحد الهيدروجين بالأكسجين لتكوين الماء.

وباستثناء الهليوم الذى لا يتفاعل، فإن الهيدروجين والأكسجين هما العنصران الأكثر شيوعًا فى المجموعة الشمسية ويرتبطان معًا على الأرض لتكوين الكميات الهائلة من الماء، الذى يعتبر المطلب الرئيسى للحياة كما نعرفها. وهما العنصران الأكثر شيوعًا فى جسمك – إنها فكرة مبتذلة، لكنها مازالت مدهشة تمامًا إذا تأملتها، حيث إن ٦٥ فى المائة من كتلة جسمك تتكون من الماء (أغلبها فى المادة الخام التى تشبه الهلام والتى تملأ كل خلايا جسدك). وإذا أخرجنا الماء من تقديراتنا، فإن نصف الكتلة المتبقية ("الوزن الجاف" فى جسمك) عبارة عن كربون، و٢٥ فى المائة أكسجين، ونحو ١٠ فى المائة فقط نتروجين. ورغم أن الكميات بالغة الصغر من المواد الأخرى فى أجسامنا مهمة جداً للعمليات الحيوية، فإننا نتكون بشكل أساسى من الكربون، الهيدروجين، الأكسجين والنتروجين – وهى العناصر الأكثر تفاعلاً فى الكون.

ولا ينتج عن ذلك بالضرورة وجود غموض فى هذا الأمر – ولا يعنى أننا أمام كون تشكل بطريقة تجعله مناسباً لإنتاج ما تحتاج إليه الحياة، بل الأكثر صحة النظر إلى الحياة على أنها تطورت وتكيفت لكى يمكنها استخدام المواد الخام التى حدث أن وجدتها متاحة. ومن هذا المنظور لن تكون حقيقة أننا نتكون من الكربون، والهيدروجين، والأكسجين، والنتروجين، أكثر إثارة للدهشة من أن أكواخ الإسكيمو مبنية من كتل

الجليد، بينما يتم أحيانًا بناء المنازل فى الأجواء الأكثر دفئًا من الطوب المصنوع من الطين الجاف. وفى كلا الحالتين فإن وحدات البناء المستخدمة هى الموجودة بوفرة أكثر من غيرها.

وهذه العناصر الأربعة (الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين) شائعة تماماً فى سحب الغاز والغبار فى الفضاء (وهى السحب التى تشكلت منها الشموس والمجموعات الكوكبية)، ومن المعتاد أن توجد هذه العناصر معاً، حتى إنه يُشار إليها أحيانًا ببساطة بكلمة تحتوى على الأحرف الأولى لكل منها CHON. وليست هناك مشكلة فى معرفة مصدر الهيدروجين – لقد كان متوفراً فى كل مكان منذ الانفجار العظيم. لذلك فإن لغز تفسير أصل المادة الخام التى نتكون منها تتحول إلى تفسير أصل الكربون والأكسجين والنتروجين – كيف تم تكوينها من الهيدروجين والهليوم البدائيين، ثم انتشارها لتشكيل السحب التى تكونت منها النجوم.

ومن أجل توضيح الموقف أسرعت قليلاً، مستخدماً مصطلحات مثل "ذرة" و"نواة" وهى مألوفة لدى معظم الناس (حتى ولو بشكل غامض)، بدون أن أزعج نفسى بتوضيح ما تعنيه هذه المصطلحات بالضبط. ولكن قد يكون الوقت مناسبًا للتوقف قليلاً لإلقاء نظرة تقديرية على ما نتحدث عنه بالضبط. إن القصة التى نتتبعها – وهى قصة CHON وقصتنا – قصة بسيطة جداً وواضحة المعالم، لكنها تتضمن أشياء، مثل الفيزياء النووية، التى نشأ أغلب الناس على التفكير فيها باعتبارها صعبة، وهى ليست كذلك. وعلى الأقل فإن المفاهيم ليست صعبة – فحل المعادلات واستخدامها لعمل محاكاة بالكمبيوتر حول ما يجرى داخل نجم ما هو أمر صعب، ولكن بمجرد إنجاز هذا العمل يصبح من السهل فهمه بمصطلحات أكثر عمومية، وبدون الاستعانة بالرياضيات. وربما تكون كلمة "فهم" كلمة مبالغ فيها إلى حد ما حيث إن بعض المفاهيم تأتى معاكسة للحس العام. ولكن من الممكن بالتأكيد تقديم ما يحدث بالكلمات والصور، بدون استخدام المعادلات.

وأهم ما فى كل هذا الأمر هو مفهوم الجسيم. ما الذى نعنيه بمصطلح "الجسيم" فى هذا السياق؟ كثيرون يألفون الآن فكرة الذرات على أنها لبنات البناء الأساسية لكل

المادة التي نواجهها في حياتنا اليومية، وأصغر وحدات أي عنصر (مادة "خالصة" مثل الأكسجين أو الرصاص أو الألمنيوم) التي يمكنها أن تلعب دوراً في التفاعلات الكيميائية، وتتحد مع الذرات الأخرى. ويجب أن تضع في اعتبارك أنه رغم أن الجزيئات تكون غالبًا تركيبًا لذرات عناصر مختلفة، للحصول على جزيئات من مركبات مثل ثاني أكسيد الكربون، تتحد الذرات أحيانًا بذرات العنصر نفسه، لتنتج جزيئات مثل الأكسجين، حيث ترتبط ذرتا أكسجين معًا. ولكن أحد الأمور التي يندر أن تسير على ما يرام عندما ندرس الذرات في المدرسة هو مدى صغرها في الواقع. فعرض الذرة لا يتجاوز ١٠ ‑٨ سم، أي يحتاج الأمر إلى مائة مليون ذرة بجانب بعضها البعض لتكوين خط طوله سنتيمتر واحد.

وعلى أي حال فإن الذرات في حد ذاتها ليست الجزيئات الأصغر التي تعتبر مهمة بالنسبة للحياة وليست، كما كان يتم تصورها في تسعينيات القرن التاسع عشر، جسيمات لا تنقسم. ويتم التعبير عن خواصها الكيميائية - أي أسباب ارتباطها ببعضها البعض على هيئة مركبات معينة وليس غيرها - تبعًا لتنظيمها على هيئة جسيمات أصغر بكثير، وهي الإلكترونات الموجودة في الأجزاء الخارجية من الذرات. والإلكترونات في العادة بالغة الصغر إلى حد لا يمكن تخيله. وحجم الإلكترون، مقارنة بذرة غبار معلقة في الهواء، بنسبة حجم ذرة الغبار نفسها إلى حجم الكرة الأرضية نفسها تقريبا. ويضاف إلى ذلك أن خواص الإلكترونات تحدد طبيعة كل التفاعلات الكيميائية، بما في ذلك كيمياء الحياة. ولا أنوي الدخول في أي تفاصيل حول كيفية عمل الكيمياء هنا (حيث إنني قدمت هذه الخلفية في كتابي "دليل تقريبي لكل شخص إلى العلم")، لكن الخاصية الكيميائية المهمة للذرة هي عدد الإلكترونات فيها. ويتم تحديد هذا العدد نفسه بالطبقة التالية في بنية الذرة، حيث تدخل هنا الفيزياء النووية في القصة.

والنواة هي القلب المركزي للذرة، حيث تتركز أغلب كتلتها. ومن حيث تصف قطرها، فإن النواة أكثر صغراً من الذرة بمقدار مائة ألف ضعف: فعرضها ١٠ ‑٨ سم مقارنة بعرض ١٠ ‑٨ سم. ويحتاج الأمر إلى عشرة آلاف مليار نواة ذات حجم متوسط لكي تغطي خط طوله سنتيمتر واحد (ولتقديم هذا الرقم بشكل يمكن تصوره، فإنه يشبه

مائة ضعف عدد النجوم في مجرة درب اللبانة الذي نعيش فيه). وتتكون نواة الهيدروجين، وهو أبسط أنواع الذرات، من جسيم واحد يطلق عليه اسم بروتون. ولكل بروتون وحدة واحدة من الشحنة الكهربائية الموجبة، ولكل إلكترون وحدة واحدة من الشحنة الكهربائية السالبة. وتعتبر كل الذرات متعادلة كهربائيًا؛ لذلك يكون عدد الإلكترونات في جزئها الخارجي هو نفسه عدد البروتونات في المنتصف. وفي حالة الهيدروجين يكون هناك بروتون واحد وإلكترون واحد. ويحدد عدد البروتونات في النواة (ويطلق عليه العدد الذري) عدد الإلكترونات في الذرة، وخواصها الكيميائية بالتالي. ويحدد عدد البروتونات في النواة العنصر الذي تنتمي إليه الذرة، ما إذا كانت ذرة كربون أو هيدروجين أو سليكون أو أي عنصر آخر.

وفي كل الذرات ما عدا الهيدروجين توجد جسيمات تسمى نيوترونات إضافة إلى البروتونات في النواة. والنيوترون مماثل للبروتون، لكن ليس له شحنة كهربائية. وكتلتي البروتون والنيوترون متماثلتان عادة - ولكل منها تقريبًا كتلة تصل إلى نحو ألفي ضعف كتلة الإلكترون - لذلك فإنها في الواقع تمثل قيمة كتلة الذرة التي تتركز في نواتها المركزية بالغة الصغر.

ولكن إذا كانت النواة تحشد في داخلها شحنة كهربائية موجبة، فلماذا لا تنفصل متعددة؟ لقد تعلمنا جميعاً في المدرسة أن الشحنات الموجبة تتنافر مع بعضها البعض، ولكن (في مدرستي على الأقل) لم يزعج أحد نفسه أبداً بتفسير سبب أن هذه القاعدة الأساسية في الفيزياء لا تبدو سارية المفعول في داخل نواة الذرة. ومع ذلك، عندما واجه علماء الفيزياء هذه المشكلة في ثلاثينيات القرن العشرين، ما أسرع ما وجدوا حلاً لها: فالنيوترونات والبروتونات (اللذين يعرفان معا بأنهما نويات) يجب أن ترتبط معًا في النواة بقوة شديدة، التي يطلق عليها، وهو أمر منطقي تمامًا، "القوة الشديدة". والقوة الشديدة التي تؤثر على كلا نوعي النويات، أكثر قوة بنحو مائة ضعف من القوة الكهربائية. ووجود النيوترونات في النواة يساعدها على ربط البروتونات معًا رغم التنافر الكهربائي الطبيعي بين كل البروتونات الموجبة الشحنة. ولكن إذا كان هناك أكثر من نحو مائة بروتون في النواة، فإن التنافر الكهربائي يمكنه أن يفصلها عن بعضها رغم القوة الشديدة، وهذا هو سبب وجود عناصر غير مستقرة تلك التي تحتوي

على ذرات تتكون من أكثر من نحو مائة بروتون (وبالطبع مائة إلكترون). وهذا نموذج سار جداً عن كيفية تأثير خواص الأشياء بالغة الصغر مثل البروتونات والنيوترونات على عالم الحياة اليومية – ويعتمد عدد العناصر فيه على الشدة النسبية للقوة الشديدة والقوة الكهربائية. ورغم أننا لا نلاحظ القوة الشديدة في حياتنا اليومية، فإن التنوع في مواد العالم حولنا دليل مباشر على وجودها بل وعلى قوتها. ونحن لا نلاحظها لأنها، فيما لا يشبه القوتين المألوفتين قوة الجاذبية والقوة الكهرمغناطيسية، لها مدى قصير جداً ويمكن الشعور بها فقط عبر مسافات تصل بالتقريب إلى حجم النواة الذرية، وهذا هو تفسير أن النوى لها هذه الأحجام. والتنوع في المادة في العالم من حولنا يعتبر دليلاً مباشراً ليس فقط على وجود هذه القوة ولكن أيضاً على شدتها.

وتعالج الفيزياء النووية كل ما يخص البروتونات والنيوترونات (النويات)، ولن نشغل نفسنا هنا بالبنية الأكثر عمقًا من هذه الجسيمات مثل الكواركات. ونحتاج فقط لأن نعرف ما يخص البروتونات والنيوترونات، وكيف ترتبط ببعضها البعض لتكوين النوى ـ وحتى الكيمياء تتبع ذلك تلقائيًا معتمدة على عدد البروتونات الموجودة في النواة، حيث لا بد أن يكون هناك العدد نفسه للإكترونات لبقاء الذرة في حالة تعادل كهربائي في مجملها.

وهناك شيئان مهمان عن النواة يجب وضعهما في الاعتبار: الأول أن الهيدروجين حالة خاصة؛ لأن نواته تتكون من بروتون واحد بدون نيوترون بجانبه. ومع إضافة حقيقة أن الهيدروجين له إلكترون واحد لحماية شحنته الموجبة من جذب الذرات الأخرى، فإن هذا يعني أن جودة إخفاء الشحنة الموجبة لنواة الهيدروجين أقل من نظيرتها بالنسبة لنواة أي ذرة أخرى، ويظل لديها قدرة على التفاعل مع الذرات الأخرى، رغم وجود إلكترونها الوحيد. وهذا الأمر مهم بالنسبة لقصة الحياة التي نعرفها. والشيء المهم الثاني عن النواة هو أن اتحاد بروتونين ونيوترونين معاً في نواة واحدة ينتج وحدة مستقرة إلى أقصى درجة ـ وهي على درجة من الاستقرار حتى تم اعتبارها في الأصل جسيم واحد، ومازال يطلق عليها اسم جسيم ألفا. والذرة التي لها جسيم ألفا في نواتها، ولها بالتالي إلكترونين في الجزء الخارجي من الذرة، هي ذرة الهليوم. ولذلك فإن جسيم ألفا يعرف أيضاً بأنه نواة هليوم (وعلى وجه الدقة نواة هليوم

4 ـ باستخدام نظام تسمية واضح يدل الرقم فيه على عدد النويات في النواة المشار إليها).

هذا هو المدى الذي علينا أن نصل إليه لنفهم أصل العناصر، بما فيها العناصر التي تتكون منها المركبات الكيميائية – أي الجزيئات – لدى الكائنات الحية مثلك. ويمكن النظر إلى البروتونات والنيوترونات والإلكترونات على أنها "جسيمات" بهذا المضمون، وإلى أن الاتحاد الخاص بين بروتونين ونيوترونين لتكوين نواة الهليوم على أنه جسيم مفرد لعدد من الأغراض (وسوف ينضم إلى القصة جسيم آخر هو النيوترينو، لكن عليه أن ينتظر دوره). والنواة هي تجميعات مختلفة من البروتونات والنيوترونات، وبعد أن تتم كسوة النوى بعباءات من الإلكترونات تصبح ذرات للعناصر المتنوعة. فماذا عن تنظيم ذرات العناصر الأربعة (الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين) CHON(مع كميات قليلة من العناصر الأخرى) لإنتاج الحياة التي نعرفها؟

إن أكثر الجزيئات إثارة للاهتمام في جسمك (وفي كل الكائنات الحية) هو البروتينات. وقد يكون ذلك أمراً مفاجئًا أمام الكم الضخم من المعلومات التي تنشر في وسائل الإعلام حول الدنا [14]، حامل الشفرة الوراثية، خلال السنوات الراهنة. ورغم أن أهمية الرسالة التي ينقلها الدنا – التي لا تتجاوز كونها برنامج عمل، أو وصفة، تصف كيفية تشكيل الكائن الحية والمحافظة عليه – فإن جزيئات الدنا نفسها مملة، مملة، مملة. إنها مخزن معلومات مثل الكتاب – قد تكون التصورات والأفكار التي يعبر بها الكتاب مدهشة ومذهلة لكن مجموعة الأحرف التي تقدم هذه الأفكار ليست سوى ٢٦ حرف تمثل الأبجدية (إذا كان الكتاب باللغة الإنجليزية)، تتخللها علامات وإشارات الترقيم، ويتم تنظيمها بطرائق معينة. وليس هناك ما هو مثير للاهتمام من حيث جوهره في خليط من الأحرف، وما يجعل الكتب مشوقة هو تفسيرنا المتفق عليه للمعاني التي تحملها تنظيمات معينة للأحرف (أي الكلمات).

(١٤) الدنا DNA : هو الحمض النووي الريبي المنقوص الأكسجين، وهو حمض نووي يحمل المعلومات الوراثية في الخلية وقادر على الانطواء الذاتي، يتألف هذا الحمض من سلسلتين من النيوكليوتيد ملتويتين بلفة حلزونية مزدوجة ومرتبطتين بروابط هيدروجينية، كما أن تتابع النكليوتيد يحدد الصفات الوراثية (المترجم)

بل إن الدنا أكثر إثارة للضجر من الأبجدية الإنجليزية، لأنه يستخدم أبجدية مكونة من أربعة أحرف فقط لنقل رسائله. ويتم التعبير عن هذه الأحرف الأربعة بوحدات فرعية كيميائية مختلفة يطلق عليها القواعد، تمتد عبر جزئ اللولب المزدوج المشهور للدنا، ويشار إليه عادة بالأحرف الأولى لأسمائها الكيميائية، مثل "س" و"ج" و"أ" و"ث". وتعمل هذه الشفرة الوراثية على تخزين ونقل المعلومات تماماً مثل أبجدية من أربعة أحرف، برسائل على هيئة كلمات ثلاثية مثل ت س س س ج ج ى س ث ج س ث ج س ى، إلخ. وهو أمر ممل بالطبع (إذا كنت لا تعرف الشفرة أو اللغة التي يتحدث بها الدنا)، ويبدو شكلاً مقيداً للاتصال مقارنة بثراء الأبجدية الإنجليزية المكونة من ٢٦ حرفاً. لكن لا تنخدع، وضع فى اعتبارك أن أجهزة الكمبيوتر تستخدم "أبجدية" أكثر بساطة بكثير، شفرة ثنائية حيث لا يوجد سوى "حرفان" صفر و ١ ويمكن أن يأخذ تسلسل شفرة ثنائية الشكل ١١٠٠١٠٠٠١١٠١٠٠١١١١٠١١٠١٠٠٠٠، إلخ، وهو ما يبدو كتسلسل ممل للأرقام. لكن يمكنك شراء قرص ذاكرة للقراءة CD - ROM يحتوى على الأعمال الكاملة لشكسبير، مخزنة كلها على هيئة تسلسل للصفر والواحد، وهو الأمر نفسه بالنسبة للدنا وجزيئات الحياة. إنها الرسالة هى التى تثير الاهتمام وليس المرسال.

وتملى الرسالة المتضمنة فى الدنا، على هيئة هذه الكلمات المتكونة من ثلاثة أحرف فى لغة الدنا، على خلايا الكائنات الحية كيفية تركيب البروتينات. والبروتينات هى الجزيئات الأكثر إثارة للاهتمام والأكثر أهمية بالنسبة للخلية (وبالتالى بالنسبة لأى كائن حى، حيث إن كل الكائنات الحية المعروفة تتكون من خلايا). وتعتمد بنية الخلية وآلاتها - أى كلا من المصنع والعمال - على البروتينات. وتحدد البروتينات نوع الخلية وكيفية نموها وكيفية انقسامها، وطريقة استخدامها للطاقة للإسراع بالتفاعلات الكيميائية التى تبنى أغلب جزيئات الحياة.

وتعتبر البروتينات جزيئات معقدة بدرجة كبيرة، وتتوافر على هيئة تنويعة ثرية بالأشكال والأحجام. فهناك البروتينات البنائية مثل الألياف التى يتكون منها شعرك، أو الغطاء الصلب لجسم الصرصور. وهناك البروتينات العمال، مثل جزيئات الهيموجلوبين التى تحمل الأكسجين فى الدم إلى كل أجزاء جسمك، والإنسولين الذى

يتيح لخلايا جسمك استخدام الطاقة المخزنة فى الجلوكوز [15]. وهناك أكثر من خمسين ألف نوع مختلف من البروتين فى جسمك. وكانت البروتينات تعتبر "جزيئات" الحياة التى نعرفها فيما يتعلق ببنية الحياة ونشاطها الكيميائى، حتى اكتشف جيمس واطسون وفرانسيس كريك طبيعة الدنا فى بداية الخمسينيات. ولقد كان يُنظر إلى الدنا ذاته باعتباره مجرد نوع من المادة كالسقالات التى تقوم عليها بنية جزيئات البروتين لكى تتماسك داخل الخلية، وأنها لا دور فعّال لها فى كيمياء الحياة.

وتتمتع جزيئات البروتين بهذه التنويعة المدهشة والتعدد لأنها تتكون من سلاسل طويلة من وحدات فرعية يطلق عليها أحماض أمينية. وفيما يخص الأحماض الأمينية فإنها تفتقر إلى أى خواص مثيرة للاهتمام بشكل خاص - أى ليس هناك ما يشير إلى أنها حية - ولكنها عندما تسلسل مع بعضها البعض بالطريقة السليمة تصبح جزيئات بروتين معقدة تنطوى على نفسها بطرائق معينة، فتنتج جزيئات البروتين بالأشكال المحددة تماماً لكى تؤدى كل أنشطة الحياة. ولا يوجد سوى ٢٠ حامض أمينى تستخدم كمركبات لكل البروتينات بواسطة كل الكائنات الحية على الأرض [16]. ورغم وجود أحماض أمينية أخرى فإن الحياة لا تستخدمها. وتستخدم كل الكائنات الحية الشفرة الوراثية نفسها - الكلمات نفسها التى تتكون من الأحرف الثلاثة فى شفرة الدنا تملى الرسالة نفسها لدى كل الخلايا الحية. وتلك بضع أدلة مقنعة تدعم فكرة أن كل الحياة الراهنة على الأرض جاءت من شكل واحد للحياة (قد يكون مجرد خلية مفردة) طوّر فى البداية القدرة على استخدام الدنا والبروتين بهذه الطريقة. وكل الآلاف من البروتينات المختلفة فى جسمك، وكل البروتينات لدى كل الكائنات الحية التى نعرفها، تتكون من الأحماض الأمينية العشرين نفسها، تماماً كما أن كل كلمات شكسبير وكل

(15) الجلوكوز glucose : سكر بسيط موجود فى الأنسجة النباتية والحيوانية. (المترجم)

(16) يوجد حمضان أمينيان آخران فى عدد قليل جداً من البروتينات، وأحد الأحماض الأمينية العشرين التى ذكرتها يوجد على هيئة شكلين مختلفين فى الأطراف، لذلك فقد تقابلك مراجع تشير إلى ٢٠ أو ٢١ أو ٢٢ وحدة بناء حمض أمينى للبروتينات، لكن ٢٠ رقم صحيح لطيف وسوف أتمسك به

الكلمات الأخرى التى تكتب باللغة الإنجليزية تتكون من الستة وعشرين حرفًا أنفسهم من أحرف الأبجدية.

ويعود الدنا مرة أخرى إلى القصة لمعرفة ما تُشفر له هذه الكلمات ثلاثية الأحرف فى أبجدية الدنا، أى الأحماض الأمينية. وبلغة الدنا فإن "الكلمة" ج أ س، مثلاً، تعنى "اصنع جزئ من حامض الأسبارتيك" بينما تُترجم الكلمة أ ج ج على هيئة تعليمات موجهة إلى معدات الخلية لتركيب جزيئ الحامض الأمينى أرجانين. ويمكنك أيضا تصور جزيئات البروتينات كما لو كانت سلسلة من الأحماض الأمينية منظمة بطريقة معينة، مثل الرسائل المكتوبة بلغة ما. وتعود أهمية جزيئات البروتين إلى التنوع فى الأحماض الأمينية.

وتحمل الأحماض الأمينية هذا الاسم لأن بنيتها تحتوى على مجموعة من الذرات المتكونة من جزىء الأمونيا (النشادر). ويتكون جزئ الأمونيا من ذرة نتروجين واحدة مرتبطة بأربطة كيماوية بثلاث ذرات هيدروجين. وإذا تم استبدال أحد ذرات الهيدروجين هذه بأى ذرات أخرى، يُطلق على المتبقى من جزىء الأمونيا بعد هذه العملية مجموعة أمينية. وفى الأحماض الأمينية تكون المجموعة الأمينية مرتبطة بذرة كربون التى ترتبط بدورها بالذرات الأخرى. ومن الأشياء الأخرى التى يرتبط بها الكربون دائمًا فى حالة الحمض الأمينى مجموعة ذرات يطلق عليها مجموعة حمض (كربوكسيليك)........ وهذا اتحاد بين ذرة كربون أخرى وذرتى أكسجين وذرة هيدروجين، وهو ما يمكن كتابته على هيئة COOH (وتشير الشرطة إلى الرابطة التى ترتبط فى هذه الحالة بذرة كربون أخرى ترتبط بدورها بمجموعة أمينية). ويظل لدى ذرة الكربون التى يرتبط بها كلا من المجموعة الأمينية ومجموعة حمض (الكاربوسيليك)، القدرة على تكوين رابطين كيماويين آخرين، والارتباط بالذرات الأخرى ومجموعات الذرات، لتتيح وجود تنويعة من الأحماض الأمينية الموجودة فى الكائنات الحية. وغالبًا ما تكون هذه المجموعات الأخرى متكونة بكاملها من الكربون،

الهيدروجين، النتروجين والأكسجين، مع ذرة كبريت وحيدة. من هنا فإن ذرات العناصر الأربعة الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين CHON فى قلب بنية البروتينات تماماً.

وتتكون جزيئات الدنا كلها أيضًا فى الغالب من هذه الذرات للعناصر الأربعة. وفى الواقع لا تحتوى الوحدات الفرعية الكيميائية الأربع التى تتكون منها أحرف أبجدية الدنا (وهى المعروفة باسم القواعد) على أى شىء آخر، لكن العمود الفقرى لجزئ الدنا، الذى يصل القواعد معًا على هيئة تتالى طويل يتهجى الرسائل بشفرة وراثية، يترابط باتحاد مع ذرات يطلق عليها مجموعة الفوسفات، وتحتوى كل منها، كما يوضح الاسم، على ذرة فسفور.

وترتبط كل مجموعة فوسفات بجزئ سكر يعرف باسم الرايبوز [١٧] منقوص الأكسجين، ولكل سكر قاعدة ملتصقة من جانبها. ويتصل جزئ السكر بمجموعة فوسفات أخرى، التى ترتبط بدورها بجزئ سكر آخر (بارتباط قاعدة)، وهكذا ... إلخ.

ومن المفيد هنا أن نستطرد بعض الشىء للتعليق على سمتين غامضتين إلى حد ما يتعلقان بكيمياء الحياة، سمتين لخواص مركبين من العناصر الأربعة تساعدان على إمداد عالم الأحياء بالثراء والتنوع. وهما سمتان مهمتان حتى أن البعض يرى أنهما قد يكونان فى الحقيقة بالنسبة لقصة الحياة أكثر من مجرد استخدام لبنات البناء المتواجدة صدفة. وأولهما، هى الصفة الأكثر وضوحاً فى كيمياء الحياة هى أنها متكونة حول الكربون - وهو بالكثرة التى تجعل دراسة كيمياء الكربون تتفق مع تسميتها بالكيمياء "العضوية".

١٧ - الرايبوز ribose : سكر وحيد السكاريد لخماسي الكربون موجود كمكون للريبوفلافين والنيوكليوتيد والحمض النووى الرايبوزى . (المترجم)

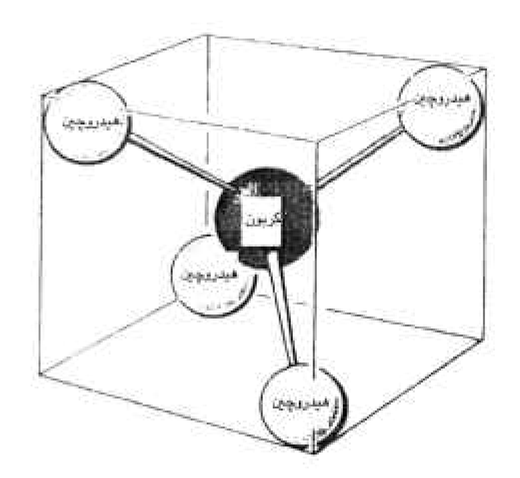
Alanine, Serine, Aspartic acid, Arginine, Valine, Threonine, Glutamic acid, Leucine, Cysteine, Histidine, Lysine, Isoleucine, Tyrosine, Asparagine, Methionine, Proline, Tryptophan, Phenylalanine, Glutamine, Glycine

الشكل ٢ - ١ الأحماض الأمينية . لاحظ أهمية ذرات العناصر الأربعة الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين CHON فى كيمياء الحياة .

والكربون أهمية كبيرة فى كيمياء الحياة؛ لأن ذرة الكربون لها قابلية لتشكيل روابط كيميائية مع ذرات أربع أخرى (قد تحتوى على ذرات كربون أخرى) فى الوقت نفسه. فالهيدروجين مثلاً يمكن أن يكون له رابطة دائمة واحدة فقط بذرة أخرى، بينما الأكسجين قدرة على أن يكون له رباطين كيميائيين. والروابط الكيميائية هى روابط بين الذرات وتتكون من الإلكترونات فى الأجزاء الخارجية من هذه الذرات ، ويحدث فى الواقع أن يصبح إلكترون واحد من كل ذرة تحت تأثير النواتين، ومن ثم يعتبر زوج الالكترونين رابطة تجعل الذرتين متماسكتين معًا . ونظراً لطبيعة تنظيم الإلكترونات فى الأجزاء الخارجية من الذرات، لا يكون لأية ذرة أكثر من أربعة أربطة فى الحين نفسه، والكربون هو الأكثر قدرة من بين كل الذرات الذى يمكنه أنه يؤدى هذه المهمة. وحيث إن أحد هذه الأربطة قد يكون مع ذرة كربون أخرى فإنه من المحتمل بالنسبة لذرات الكربون أن تشكل سلاسل طويلة، مع وجود أشياء مهمة متصلة بجوانب السلاسل، أو الحلقات، مع أشياء أخرى مهمة متصلة حول حافة الحلقة. وهذا هو الذى يعطى الثراء لكيمياء الكربون - الكيمياء العضوية. وهناك ذرات أخرى يمكنها أن تشكل أربعة روابط فى الوقت نفسه (السلكون مثلاً) ولكن كما رأينا من قبل فإنها أقل شيوعًا من الكربون. لذلك فقد يكون جمع الكربون بين شيوعه وقدرته الكيماوية على الارتباط هو الذى يجعله بكل هذه الأهمية بالنسبة للحياة.

والسمة الثانية المثيرة للاهتمام تتعلق بالهيدروجين، وهو أبسط الذرات. وكان من اللوم أن أذكر أنه يمكنه أن يشكل رباطًا كيميائيًا دائمًا واحدًا فى الوقت نفسه؛ لأنه يمكنه أيضاً أن يشكل نوعًا من الروابط أكثر ضعفًا مع ذرة أخرى نظراً لطبيعة بروتونه المفرد الذى يحتمى بشكل غير كاف من البيئة الخارجية بواسطة إلكترونه الوحيد. وبشكل خاص عند استخدام الإلكترون فى عمل رابطة كيميائية مع ذرة أخرى (مثل جزيء الماء حيث ترتبط ذرتا هيدروجين بذرة أكسجين واحدة)، يمكن للشحنة الموجبة فى البروتون أن تظل مؤثرة، ومتأثرة، بالشحنة السالبة للألكترونات فى الذرات الأخرى القريبة. ونكون النتيجة ظهور جزيئات تحتوى على ذرات هيدروجين "لزجة" من الناحية الكهربائية. وعندما تتزاق جزيئات الماء متجاوزة بعضها البعض، تنجذب ذرات

الهيدروجين فى أحد الجزيئات إلى ذرات الأكسجين فى جزيئات أخرى. وهذه اللزوجة هى التى تجعل الماء سائلاً عند درجات الحرارة السائدة فى الوقت الراهن على الأرض. وعلى العموم فإن درجة الحرارة التى يسيل عندها الغاز تعتمد على كتلة



شكل ٢ - ٢ بنية هيدروكربون ميثان [١٨] بسيط (وهو مركب يحتوى على الهيدروجين والكربون) [١٩] يوضح الطريقة التى تتمكن بها ذرات الهيدروجين من تكوين أربع أشكال شائعة من الروابط الكيميائية مع الذرات الأخرى - وهى خاصية مهمة بالنسبة لكيمياء الحياة.

(١٨) الميثان: غاز المستنقعات والمناجم . (المترجم)

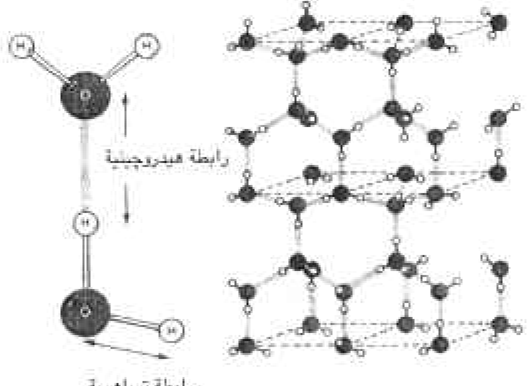
(١٩) الهيدروكربون عموماً هو مركب عضوى (كالبنزين والاسيتيلين) متضمن كربوناً وهيدروجيناً فقط . (المترجم)

جزيئاته، حيث تتكثف الجزيئات الأكثر ثقلاً لتكوين سوائل عند درجات الحرارة الأكثر ارتفاعاً. لكن الوزن الجزيئى لجزىء الماء لا يتخطى ١٨ وحدة، على المقياس العادى، وبعض المواد الأخرى مثل ثانى أكسيد الكربون، الذى يصل وزنه الجزيئى إلى ٤٤ وحدة (أكثر من ضعف نظيره بالنسبة للماء)، فى حالة غازية عند درجة حرارة الغرفة، بينما يكون الماء سائلاً.

ويطلق على انجذاب ذرات الهيدروجين، التى تكون متصلة مباشرة بجزئ واحد، إلى الذرات الأخرى المجاورة، رباط هيدروجينى. وهو رباط أكثر ضعفاً من الشكل المعتاد للترابط الكيميائى، لكنه ليس أقل منه تواجداً، وهو مهم جداً للحياة التى نعرفها. وترتبط جديلتى اللولب المزدوج للدنا ببعضهما بأربطة هيدروجينية بكاملهما، وبطريقة محددة تماماً. ويحدث عندما تتواجه قاعدتين تعرفان بحرفى "ث" T و"أ" A [٢٠] وجهاً لوجه بالطريقة الصحيحة تماماً (ويكون كل منهما متصل بالطبع بجزئ السكر الخاص به والذى يعتبر جزء من العمود الفقرى لضفيرة دنا واحدة)، أن يتمكنا من عمل زوج من الروابط الهيدروجينية تربطهما معاً بشكل غير محكم، مثلهما مثل قابس كهربائى ذو قطبين ومقبس ذو فتحتين. وترتبط القاعدتان "س" C و "ج" G [٢١] بالطريقة نفسها، لكنهما يعملان فى هذه الحالة ثلاثة روابط هيدروجينية، مثل قابس ذو ثلاثة أقطاب ومقبس ذو ثلاث فتحات. والتزاوج محدد تماماً؛ حيث "ث" تتزاوج مع "أ"، لكن أى منهما لا تتزاوج مع "س" أو مع "ج" ، و "س" و "ج" تتزاوجان معاً ، لكن أى منهما لا تتزاوج

(٢٠) "ث" الثايمين و "أ" للأدنين (المترجم) .

(٢١) "س" للسيتوزين و "ج" للجوانين (المترجم) .

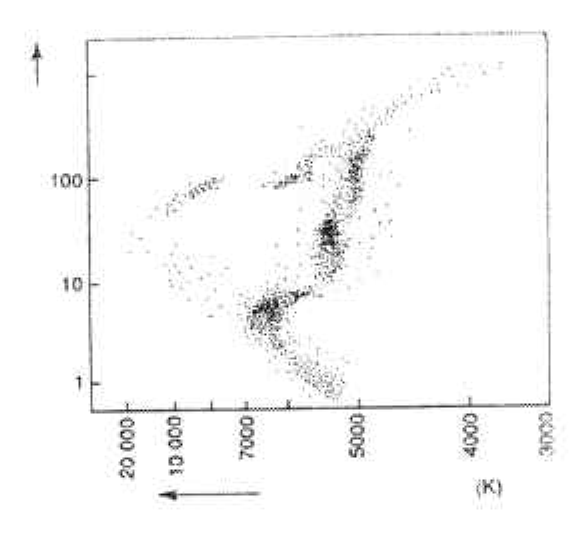


شكل ٢ - ٣ نظراً للسمات الخاصة لذرات الهيدروجين، التي وردت في النص، يمكنها أن تعمل رابطة ضعيفة نسبياً، يطلق عليها رابطة هيدروجينية، مع بعض الذرات الأخرى في الظروف المناسبة. وتؤثر الروابط الهيدروجينية بين جزيئات الماء، مما يجعل الماء سائلاً عند درجات الحرارة المرتفعة نسبياً ، ويجعل الثلج يتشكل على هيئة بنية مفتوحة وصلبة

مع "ث" أو "أ". وهذا ما يفسر قدرة آلية الخلية على "فك" اللولب المزدوج للدنا، ويتم استخدام كل جديلة كقالب يمكن لآلية الخلية هذه (التي تكون على هيئة جزيئات بروتين) أن تصنع نسخة من الضفيرة المفقودة، بحيث يتم الحصول على جزيئي دنا متماثلين تماماً عندما يكون هناك جزيء واحد في العادة ، وهي خطوة مهمة بالنسبة للتكاثر.

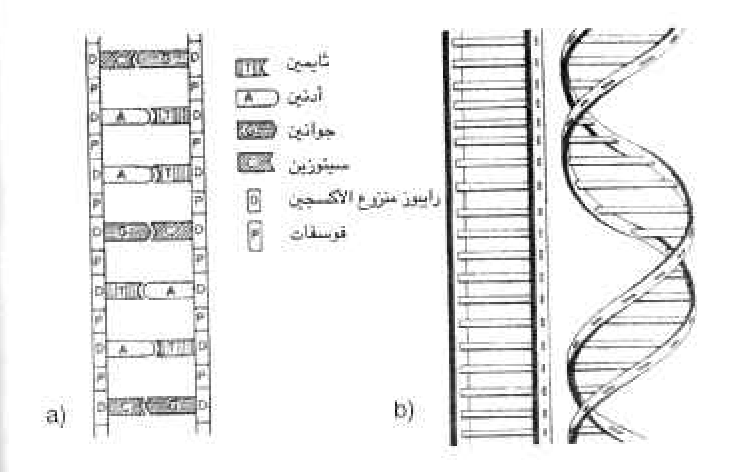
تذكر أن هناك بالنسبة لذرات العناصر الأربعة CHON ما هو أكثر من الحقيقة البسيطة القائلة بأنها المواد الأكثر انتشاراً في الواقع للاستخدام في كيمياء الحياة. حيث هناك أيضاً جانب آخر للحكاية؛ فحتى يُتاح للحياة أن توجد لا بد أن يكون هناك

إمداد بالمواد الخام الكيميائية وبالطاقة . والمكان الوحيد الذي نعلم بالتأكيد أن الحياة ... فيه هو كوكبنا الذي نعيش عليه، أي الأرض. فهل هناك شيء ما تتصف به ... بشكل خاص مما يجعلها مناسبة لتوطين الحياة؟



... ٢ - ٤ زوجا القواعد الأساسيين في الدنا حيث يتم الربط بينهما بالروابط الهيدروجينية ... أساسية للحياة التي نعرفها، ولاحظ من جديد أهمية ذرات العناصر الأربعة CHON.

... إنني أضع في اعتباري في هذا الكتاب "الحياة كما نعرفها" فقط، فقد تظن ... الشروط المطلوبة لوجود الحياة تكون نادرة على الأرجح. وبالتأكيد فإنه من جانب



شكل ٢ - ٥ "أ" عدة أنواع من الروابط الهيدروجينية التي تربط ضفيرتي الدنا مما يتيح بنية أكثر شبهاً بالسلم، حيث تتمدد ضفيرتا الدنا بجانب بعضهما. "ب" ويكون السلم، في الواقع، ملتوياً لكي يصبح على الهيئة المشهورة للولب المزدوج.

ما تعتبر الأرض كوكباً غير عادي، حتى بمقياس مجموعتنا الشمسية، وليس لدينا بعد طرائق لمعرفة ما إذا كانت مجموعتنا الشمسية مطابقة للمجموعات الكوكبية المصاحبة لنجوم أخرى مثل الشمس، رغم معرفتنا بوجود كثير جداً من النجوم المماثلة للشمس. ويُستخدم هذا الإثبات أحياناً للتدليل على أن الحياة التي نعرفها نادرة بشكل مضاعف - مما يتطلب كوكب غير عادي يكون هو نفسه جزء من مجموعة كوكبية غير عادية. ولا اعتبر هذا الدليل مقنعاً؛ لأن أية نظرة مدققة للمجموعة الشمسية توضح أنها قد تكون غير عادية في الاتجاه العكسي. فهناك دليل يوضح أنه قد يكون العثور على حياة على كوكب واحد في مجموعة شمسية أمر نادر، ليس لأن أغلب المجموعات

الكوكبية غير مناسبة كموطن للحياة، ولكن لأن أغلب المجموعات الكوكبية فيها أكثر من موطن واحد مناسب للحياة.

وأهم شيء لوجود الحياة التي نعرفها هو الماء، لدرجة أن الكلمة التي نستخدمها للإشارة إلى منطقة بدون سائل الماء هي الكلمة نفسها التي نستخدمها للإشارة إلى منطقة بدون حياة - وهي "الصحراء" (٢٢) . وتوجد أسباب قوية لذلك تعتمد على الخواص الفيزيائية والكيميائية للماء. فالماء شيء جيد للمحافظة على الأشياء الأخرى (المواد الكيميائية الأخرى) في محلول، فيعطي هذه الأشياء الأخرى فرصة التفاعل مع بعضها البعض. وهو يحميها أيضاً من بعض الشروط الأكثر قسوة في البيئة الخارجية، مثل إشعاع الأشعة فوق البنفسجية المدمر، الذي قد يكون اكتسح سطح الأرض قبل ظهور غلاف جوي ثري بالأكسجين. وفي حدود درجات حرارة مناسبة (والحدود الواسعة لتنوع درجات الحرارة شيء شائع على الأرض)، لا يكتفي الماء بالتواجد هنا وهناك على هيئة جليد، أو التدفق في كل مكان كسائل، أو الطفو في الهواء كغاز، وهو يفعل هذه الأشياء الثلاثة في الوقت نفسه، حتى إن كل الأطوار الثلاثة للماء (صلب وسائل وغاز) توجد معاً في حالة توازن ديناميكي، حيث تتبادل الجزيئات بشكل دائم مواقعها بين الأطوار الثلاثة. وهذا يساعد في انتشار الماء حول الكوكب. فالرطوبة تتبخر من البحر لتصبح غازاً، وتسقط على هيئة أمطار لتصبح أنهاراً ثم تعود مرة أخرى إلى البحر. ويساهم ذلك في وجود الحياة على الأرض وأيضاً في المحيطات (وهو في الواقع شرط مسبق مطلق لوجود بعض أشكال الحياة مثلنا على أرض جافة). من ثم فإنه من أجل هذه الدراسة، أنوي وضع حتى المزيد من المتطلبات المقيدة (لكن البسيطة) لوجود الحياة التي نعرفها. سوف أعتبر أي كوكب مرشح لاستضافة الحياة إذا وجود سائل الماء عليه.

وتنتج هذه الخواص المهمة للماء بشكل جزئي من قدرته على عمل روابط هيدروجينية، لذلك فإن هذه الخواص ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالخواص الأساسية للذرات.

(٢٢) كلمة صحراء desert تدل على الخلو من الماء أي أنها أرض قاحلة خالية من الماء وتدل أيضاً على أنها أرض مجدبة خالية من الحياة (المترجم)

وللرابطة الهيدروجينية أهمية أيضًا في خاصية أخرى غير عادية للماء، وهي ترتبط بالتأكيد ارتباطًا صميميًا بوجود الحياة على الأرض، وقد تكون لها دلالة أكثر فيما يتعلق بالكون.

يطفو الجليد، إنها لظاهرة معتادة حتى أن رد الفعل التلقائي تجاه هذا القول سيكون "وماذا بعد؟". لكن تأملها قليلاً، فقد يدهشك مثلاً أن ترى بركة رصاص صغيرة حيث تطفو عليها كتلة ضخمة من الرصاص الصلد، مهما تم التعامل مع درجة حرارة السائل بحرص. ففي الوضع الطبيعي للأمور تكون المواد الصلبة أكثر كثافة من شكلها السائل، من ثم يجب أن تغرق الكتلة الصلبة من أي مادة في أي كمية من هذه المادة على شكل سائل. وسبب عدم انطباق ذلك على الماء، يعود فقط إلى طريقة تكوين الأربطة الهيدروجينية بين الجزيئات. ولأن الجزيئات المفردة تكون على شكل حرف V، مع وجود ذرة الأكسجين على قمة هذا الحرف ووجود ذرتا الهيدروجين على نهايتي طرفي الحرف V، فإنه في حالة تجمد الماء تقوم الروابط الهيدروجينية بين ذرات الهيدروجين في جزئ واحد وذرات الأكسجين في جزيء آخر، بربط مجموعة الجزيئات معًا على هيئة نظام شبكي مفتوح تمامًا (تكون في الواقع مشابهة تمامًا البنية الشبكية لبلورة ماسة، ولكن ليس في شدتها، انظر شكل (٢ - ٣) والنتيجة أن جزيئات الماء تكون متباعدة إلى حد ما عن بعضها البعض مقارنة بوضعها في الشكل السائل عندما تكون بالكاد فوق درجة حرارة التجمد. وفي الحالة السائلة تتباعد الجزيئات عن بعضها البعض ثم تتقارب، بدون "تعديل" الروابط الهيدروجينية. وعند هبوط درجة الحرارة إلى درجة التجمد، تحتل الجزيئات مكانًا في الشبكة البللورية.

هكذا يطفو الجليد على الماء، فماذا يجعل هذا الأمر مهمًا بالنسبة للحياة؟ أقل ما في الأمر أن طفو الجليد على سطح محيط بارد يقوم بدور غطاء يحافظ على أي حرارة متبقية فيه، ويوقف التبخر من السطح، مما كان سيؤدي إلى مزيد من برودة المحيط. ولا بد أنه كان هناك كثير من العصور الجليدية على الأرض، وقع ذلك عندما كانت أجزاء كبيرة من سطح المحيطات (مثل منطقة القطب الشمالي في العصر الراهن) مغطاة بالجليد الطافي. ولو كان الجليد قد تصرف كأي مادة صلبة تحترم نفسها لغاص في الماء السائل، وعندما يجئ عصر جليدي تكون النتيجة تجمد المحيطات من

السطح إلى القاع. وكان على الجليد المتكون على سطح الماء البارد أن يغوص إلى القاع، وكلما تكوّن جليد على السطح غاص إلى القاع .....إلخ. وكان على العملية أن [illegible] حتى تصبح المحيطات كتلة صلبة من الجليد، دون وجود أي ماء سائل. وإذا [illegible] ذلك في أي وقت لكان من الصعب تماماً إذابة هذا الجليد من جديد فإنه حتى لو [illegible] الطقس فإن الجليد سيعكس كمية ضخمة من الحرارة الآتية من الشمس، وقد [illegible] لتذويب كل هذا الجليد إلى كمية ضخمة جداً من الطاقة.

[illegible] أيضًا رؤية تأثير طفو الجليد على المحافظة على شروط مناسبة الحياة في بركة أسماك في الحديقة. فطبقة الجليد التي تطفو على البركة شتاء تحافظ على الماء سائلاً أسفلها، وتوفر بيئة مناسبة للأسماك. فلو تجمدت البركة من قاعها حتى سطحها، فقد يتقرر مصير الأسماك وتنجو ولو بمجرد جو بارد منعش. وفي حالة التجمد الشديد فإن العمل الصائب للمحافظة على الأسماك فتح ثقب صغير في الجليد، يسمح بوصول الأكسجين إلى الماء، وأسوأ شيء تحطيم طبقة الجليد بكاملها، الذي قد يجعل مزيدا من الماء للتعرض للهواء ويساهم في تجمده.

ويرتبط هذا الأمر بشكل خاص بما ندرسه هنا، ولقد سمحت لنفسي بإيراد هذا التفصيل في القصة، لأن ذلك قادنا الآن إلى معرفة الوطن المحتمل للحياة في المجموعة الشمسية الذي يوجد لمجرد طفو الجليد على الماء. وجاءت أحد أكبر المفاجآت في عصر الاستكشاف الفضائي للكواكب في أواخر التسعينيات، عندما زار المسبار جاليليو [illegible] كوكب المشترى وعبر القمر إيروبا أكثر من مرة مرسلاً إلى الأرض بصور وبيانات أخرى. ويشير الدليل بشكل قاطع إلى أن غالبية سطح إيروبا (وقد يكون كل السطح) مغطى بغطاء جليدي، مماثل تمامًا للجليد الذي نجده في القطب الشمالي وإيروبا دافئ بالكاد (فقط بالكاد!) بما يكفي للماء أن يوجد على هيئة سائل لأن قوى المد والجزر الخاصة بالمشترى، تعتصر باستمرار القلب الصخرى للقمر في عملية شد و[illegible] مما ينتج عنه حرارة في داخله. من هنا فإنه بدون هذا الغطاء الجليدي يمكن للحرارة أن تفلت بعيداً وأن يتجمد القمر. وبسبب هذ الغطاء الجليدي يُنظر حاليًا إلى إيروبا كوطن محتمل للحياة، وهناك خطط لإرسال بعثات فضائية في المستقبل لإسقاط مسابر لاختراق الجليد واستكشاف البيئة المائية أسفله.

وهناك احتمال لوجود حياة على قمر آخر فى الجزء الخارجى من المجموعة الشمسية، لتيتان، وهو أكبر أقمار الكوكب زحل، قطر ٥١٥٠ كم (وهو أكبر بنسبة ٥٠ فى المائة من قمرنا)، وله غلاف سميك (ولكن بارد – ١٨٠° مئوية) من النتروجين. وتم وصفه كشبيه للأرض فى الأزمنة المبكرة، قبل ظهور الحياة، لكنه متجمد تماماً. فإذا حدث ما يدفئ تيتان إلى الدرجة التى تتيح لسائل الماء أن يتدفق، فمن المحتمل (وحتى لو كان مجرد احتمال) أن العمليات التى أدت إلى ظهور الحياة على الأرض قد تحدث هناك أيضاً.

ولهذا علاقة مباشرة بالموضوع الذى نبحثه حيث كانت هناك مفاجأة أخرى واجهت علماء الفلك فى أواخر التسعينيات. فكما ذكرت فى المقدمة هناك دليل فى الوقت الراهن على وجود كواكب ضخمة تدور حول بضع عشرات من النجوم، وتظهر عن طريق شد الكواكب بواسطة جاذبية نجومها الأصلية التى تهزها نحو الخلف والأمام. وحتى الآن يمكن رصد الكواكب الضخمة فقط بهذه الطريقة، لأن تأثير الاهتزاز صغير جداً لدرجة أنه يصعب رصده بالنسبة لكواكب فى حجم الأرض. والمفاجأة الكبرى أن أغلب الكواكب العملاقة التى تم رصدها حتى الآن بهذه الطريقة اتضح أنها قريبة جداً من نجومها الأصلية، بل كانت فى بعض الحالات أقرب حتى من بعد الأرض من الشمس (وللمقارنة فإن المشترى، وهو الكوكب الأكبر فى مجموعتنا الشمسية، أبعد منا بمقدار خمس مرات عن الشمس). وتعتبر هذه الأنباء عادة سيئة بالنسبة لاحتمال العثور على حياة فى هذه المجموعات الكوكبية، لأن الكوكب العملاق الموجود على مدار بهذا القرب حول نجمه قد ينتج عنه تأثير جاذبية يؤثر على أى كواكب فى حجم الأرض على مدارات مثل مدارات الأرض ويكون هذا التأثير من القوة بحيث يطرد هذه الكواكب تماماً من المجموعة النجمية، بنوع من التأثير مثل قذيفة عصا الرماية. لكن هذه المناقشة لا تتضمن ما يحدث فى حالة ما إذا كان لهذا الكوكب عائلة من الأقمار، وما إذا كان بعض هذه الأقمار يشبه إيروپا أو تيتان، حيث تكون هناك فرصة لوجود شروط على هذه الأقمار مناسبة للحياة. وحيث إن للمشترى أربعة أقمار كبيرة ولزحل أربعة أخرى (مع اعتبار أن "الضخامة" تعنى أن الجرم له قطر أكبر من ١٠٠٠ كم)، فحينئذ ينتج عن وجود كوكب عملاق على مدار مماثل لمدار الأرض زيادة فى عدد

الأوطان المحتملة للحياة فى مجموعة نجمية، بغض النظر تماماً عن احتمال وجود أشكال حياة مختلفة بدرجة كبيرة عن تلك التى نعرفها على الأرض قد تكون موجودة فى الأغلفة الجوية لهذه الكواكب العملاقة نفسها.

لذلك نعرف "مفقودين قريبين" على الأقل فى المناطق الخارجية من مجموعتنا الشمسية، خلف حزام الكويكبات، الذى يوضح حدود مدارات الكواكب الصغيرة الصخرية. وحتى لو حصرنا فكرنا فى تلك الكواكب الأربعة الداخلية (التى تسمى أحياناً الكواكب الأرضية تمييزاً لها عن العمالقة الغازية أو الكواكب الشبيهة بالمشترى)، فإننا سنصل إلى أن عدم وجود كوكبان مأهولان يدوران حول شمسنا هو مجرد سوء حظ، وكم كان من حسن الحظ أن يكون هناك حتى كوكب واحد مأهول.

دعنا ننسى كل ما يخص عطارد، وهو أقرب الكواكب إلى الشمس، وهو عالم صحراوى بدون هواء، مثل قمرنا، ذو سطح ملئ بالحفر (وهو يشبه فى ذلك أيضاً قمرنا). ويعتبر عطارد بقطره الذى يصل إلى ٤٨٨٠ كيلومتراً، متوسطاً فى الحجم بين القمر والمريخ. ونظراً لعدم وجود غلاف جوى يمكنه التقليل ما بين اختلافات درجات الحرارة بإطلاق رياح حول الكوكب، فإن درجات الحرارة على سطح عطارد تتراوح بين ما يتجاوز ٤٠٠ مئوية فى وقت "الظهر" المحلى إلى – ١٨٠° مئوية فى الليل. وبالقطع ليس هذا هو المكان المناسب للحياة التى نعرفها.

وللوهلة الأولى لا يعطى كوكب الزهرة بالتأكيد انطباعاً مسبقاً بأنه مناسب للحياة، رغم أن كتلته تصل إلى ٨٢ فى المائة من كتلة الأرض وقطره يصل إلى ١٢١٠٤ كيلومتر، مما يجعله أقرب كوكب إلى الأرض (التى يصل قطرها إلى ١٢٧٥٦ كيلو متر) من ناحية الحجم والمسافة. وبينما ليس لعطارد غلاف جوى جدير بالذكر، إذا تعلق الأمر بالحياة التى تشبه حياتنا، فإن للزهرة غلاف يستحق الذكر. وهذا الغلاف السميك، المتكون فى أغلبه من ثانى أكسيد الكربون، ينتج عنه ضغط على سطح الزهرة يصل إلى ضعف الضغط الجوى على مستوى البحر على الأرض ٩٠ مرة. ولأن كوكب الزهرة أقرب منا إلى الشمس، فقد تتوقع أن يكون أفضل من الأرض، لكن ظاهرة

الصوبة الزجاجية لهذا الغلاف السميك المتكون من ثانى أكسيد الكربون جعلت درجة الحرارة تصل إلى حدودها القصوى، فدرجة الحرارة الحارقة على سطح الزهرة ٤٥٠° مئوية على الأقل. ويكون الكوكب فى الغالب مغطى بسحب على مستويات مرتفعة، تعكس الضوء القادم من الشمس وتجعل الكوكب جرمًا لامعًا فى السماء، يمكن رؤيته عادة فى الصباح المبكر أو فى المساء المبكر -لكن هذه السحب تحمل حمض الكبريتيك، وهذا يفسر الحمضية العالية للأمطار التى تسقط على سطح الزهرة.

ومع ذلك فإنك إذا قارنت الزهراء بالأرض وفكّرت فى الدليل الجيولوجى حول الطريقة التى تمكنت الأرض من خلالها الحصول على غطاء جوى أقل تواضعًا بكثير من غلاف الزهراء، سوف تظهر لك صورة مثيرة للاهتمام. فإذا قارنت أولاً الأرض مع القمر، سوف ترى شدة ظاهرة الصوبة الزجاجية. فمتوسط الحرارة على القمر (المأخوذ متوسطاتها عبر الارتفاعات المختلفة وبين الليل والنهار) هى - ١٨° مئوية. وهذه بالضبط درجة الحرارة التى يجب أن يكون عليها أى جرم مثل كرة صخرية ساكنة فى الفضاء، على مسافة مثل مسافة الأرض والقمر من الشمس، تبعًا لقوانين الفيزياء المعروفة التى تحكم طرق امتصاص أشياء مثل الكتل الصخرية للحرارة وإعادة إشعاعها. ومن بين ما يعنيه ذلك أن درجة حرارة الأرض، إذا لم يكن لها غلافًا جويًا ولا محيطات فيها وكانت مجرد كرة صخرية فى الفضاء، ستكون أيضًا - ١٨° مئوية. وفى الواقع يقترب متوسط درجة الحرارة فوق سطح كوكبنا من ١٥ مئوية.

والفرق (الذى يصل إلى سخونة مقدارها ٣٣° مئوية) ناتج كله عن ظاهرة الاحتباس الحرارى بسبب الغازات فى الغلاف الجوى للأرض، خاصة ثانى أكسيد الكربون وبخار الماء. وتخترق الطاقة القادمة من الشمس، على هيئة أشعة شمسية، الغلاف الجوى دون عائق تقريبًا وتؤدى إلى سخونة سطح الكوكب. ويعيد السطح الساخن إشعاع الطاقة ولكن بطول موجة أطول، من خلال جزء الأشعة تحت الحمراء فى الطيف. ويتم امتصاص بعض من هذه الأشعة تحت الحمراء فى الجزء السفلى من الغلاف الجوى، مما يجعل سطح الأرض أكثر سخونة مما قد يكون عليه الحال فى ظروف أخرى. وهذا ما يعرف بظاهرة الاحتباس الحرارى - ومرة أخرى نقول إن

زيادة درجة الحرارة الملحوظة هنا على الأرض تتفق تمامًا مع حسابات التسخين الناجم من كمية ثانى أكسيد الكربون وبخار الماء التى يتم قياسها فى الهواء.

ومن هذه الزاوية تعتبر ظاهرة الاحتباس الحرارى شيء مفيد - حيث بدونها ما كان لنا أن نوجد هنا. من هنا فإن علماء المناخ (وحتى السياسيون) يعبرون عن قلقهم من ظاهرة الاحتباس الحرارى الراهنة لأن الأنشطة الإنسانية (مثل حرق الوقود الأحفورى وخلافه) تضيف كميات أخرى من ثانى أكسيد الكربون فى الجو، مما يدعم ظاهرة الاحتباس الحرارى ويجعل سخونة الغلاف الجوى للأرض أمرًا مستمرًا (وهى زيادة توصف أحيانًا بأنها ظاهرة احتباس حرارى "مصدره الإنسان")، وما قد ينتج عنها من نتائج مدمرة على الزراعة.

ويعتبر ثانى أكسيد الكربون الذى ينتج بشكل طبيعى فى غلاف الأرض حاليًا مجرد جزء صغير من الغلاف الجوى، ولهذا السبب يصبح للأنشطة الإنسانية تأثير أكبر نسبيًا. ويأتى هذ الغاز فى الأصل من النشاط البركانى، أى من "الغازات المطرودة" التى يخرج منها ثانى أكسيد الكربون ضمن غازات ومواد أخرى من باطن كوكب الأرض. وتؤدى عمليات مشابهة إلى تخليق الأغلفة الجوية فى الزهرة والمريخ.

وخلال العصر الجيولوجى، يصل إجمالى كمية ثانى أكسيد الكربون التى انبعثت بهذه الطريقة من داخل الأرض إلى ٦٠ - ٧٠ ضعف كمية الغاز فى الغلاف الجوى لكوكبنا فى الوقت الراهن - ليس من ٦٠ إلى ٧٠ ضعف كمية ثانى أكسيد الكربون، ولكن ٦٠ - ٧٠ ضعف كل ما هو موجود فى الغلاف الجوى فى وقتنا الحالى، مع العلم بأنه يحدث ضغطًا على سطح الأرض حاليًا أكبر من ٦٠ إلى ٧٠ مرة من الضغط الناجم عن الغلاف الجوى الحالى. ولو أن كل ثانى أكسيد الكربون هذا ظل موجودًا فى الغلاف الجوى، لنتجت أحوال تتسيد عليها ظاهرة احتباس حرارى لا يُقاوم ويشبه إلى حد كبير الأحوال التى نرصدها الآن فعلاً على سطح الزهرة. وبدلاً من أن يكون كوكب الزهرة توأمًا للأرض، كانت الأرض ستصبح توأمًا للزهرة. فلماذا لم يحدث ذلك؟

عندما تصل درجة الحرارة على أى من الزهرة أو الأرض إلى درجة غليان الماء، فإن كل الماء يتحول إلى بخار، مما يؤدى إلى مزيد من رفع تأثير ظاهرة الاحتباس

الحراري. وسبب أن الأرض لم يحدث لها ما حدث للزهرة أنها منذ ظهرت إلى الوجود، وبمجرد أن أصبح لها غلاف جوي، كان الماء موجوداً عليها. ويذوب ثاني أكسيد الكربون في الماء ويدخل في تركيب الصخور الكربونية، وعن طريق قياس كمية ثاني أكسيد الكربون الموجودة في الصخور يستطيع علماء الجيولوجيا معرفة كمية ثاني أكسيد الكربون التي انبعثت على هيئة غازات خلال عمر الأرض.

ولأن كوكب الزهرة أقرب إلى الشمس منا بمقدار لا يستهان به، فإنه كان منذ الأيام الأولى في عمر المجموعة الشمسية ساخن إلى درجة لا تتيح تكوين محيطات من سائل الماء، وفي حالة عدم وجود محيطات فإن كل ثاني أكسيد الكربون المنبعث على هيئة غاز يلتحق ببخار الماء في الغلاف الجوي لتكوين أكثر الأغلفة الجوية سمكًا الذي نرصده في الوقت الراهن، مع ظاهرة احتباس حراري شديد. من هنا لم تكن صدفة أن ضغط الغلاف الجوي على الزهرة في الوقت الراهن يصل إلى ٩٠ ضعف نظيره على الأرض، وهو الضغط نفسه تقريبًا الذي كان متوقعًا من غلافنا الجوي لو لم يدخل أي من ثاني أكسيد الكربون في الصخور. وتنبعث كميات مماثلة من ثاني أكسيد الكربون في الكواكب المتشابهة. ولو كانت الشمس أبرد قليلاً، أو لو كان كوكب الزهرة أبعد بعض الشيء عن الشمس، لكان قد أصبح توأمًا للأرض فعلاً، عليه محيطات وغلاف جوي رقيق وفيه حياة.

والآن للنظر أبعد قليلاً عن الشمس مقارنة بمكاننا منها. سوف نجد كوكب المريخ، وله غلاف جوي رقيق، وأغلبه تقريبًا من ثاني أكسيد الكربون. وهو الآن صحراء حمراء، ولا علامة على وجود حياة عليه. ولكن هناك ما يدل على أن هذه الصحراء قد شهدت من قبل تدفق مياه على المريخ، حيث توجد قنوات شقتها مياه عبر العصور وأودية نهرية، وتضاريس جيولوجية تشبه إلى درجة لافتة للنظر التضاريس التي تكونت على الأرض نتيجة نشاط الماء أسفل السطح. ويبدو أن المريخ خلال الفترة المبكرة من عمره كان له غلاف جوي أكثر سمكًا إلى حد ما، مع ظاهرة احتباس حراري شديد كاف لتدفق المياه. ولكن نظرًا لأن المريخ أصغر من الأرض بكثير (فله نصف قطرها فقط وعشر كتلتها) فإن مادته الداخلية بردت بسرعة كبيرة وتوقف نشاطه الجيولوجي منذ عصر بعيد، لذلك لم ينبعث المزيد من غاز ثاني أكسيد الكربون. ومرة أخرى نقول إنه

نظرًا لصغر الكوكب، فإن الغلاف الجوي الذي تكون مبكرًا فُقد في الفضاء، لأن جاذبية المريخ لم تكن كافية للاحتفاظ به. وكلما كان سمك الغلاف الجوي ينخفض كانت ظاهرة الاحتباس الحراري تضعف ويتجمد الكوكب – هذا رغم أنه ما يزال هناك احتياطي كمية ضخمة من الماء، متجمدة أسفل السطح. فلو كان المريخ في حجم الأرض، لكان قد أصبح هناك كوكب توأم في ذلك الجانب حيث يوجد مدارنا حول الشمس.

وإذا نظرنا إلى هذا الموضوع من جانب درجة حرارة الشمس. وعلى أي حال فإن الأمور لا تتصف جميعًا بالسطوع نفسها. وقد تقول (كما يقول البعض) إننا محظوظون بأن تكون حرارة الشمس كافية بالكاد لجعل الأرض موطنًا مناسبًا للحياة، فليست شديدة السخونة وليست شديدة البرودة، لكنها مثل عصيدة بيبي بير "مناسبة تمامًا" وهو ما يُطلق عليه أحيانًا تعبير (أفضل الاختيارات). فلو كانت الشمس أبرد ولو قليلا لكانت الأرض والزهرة موطنين للحياة، ولو أصبحت أكثر برودة بعض الشيء لكان هناك ماء على الزهرة، حتى لو تجمدت الأرض. ولو كانت الشمس أكثر سخونة بعض الشيء، حتى لو لحقت الأرض بالزهرة في مصيدة الاحتباس الحراري المتخلي المحدود، لنجا المريخ وأصبح كوكبًا مناسبًا لفترة طويلة من الزمن كافية لتطور حياة عليه. ويبدو أنه بالنسبة لمجموعة كوكبية مثل مجموعتنا، من الصعب تجنب وجود كوكب واحد على الأقل، كحد أدنى، توجد عليه مياه، وهذا هو سبب أن رأيي الشخصي هو أننا محظوظون تمامًا في ألا يكون لنا كوكب مجاور واحد على الأقل. ليس من السهل أن نصل إليه بقدرات مركبات الفضاء الموجودة لدينا حاليًا يكون مناسبًا لوجود الحياة التي نعرفها.

وكل الأدلة تشير إلى أن الكواكب الأخرى (أو الأقمار) التي يحتمل وجود حياة عليها كتلك التي نعرفها، تدور حول بضعة نجوم على الأقل من النجوم التي نراها في السماء. إذن دعنا ننطلق إلى الكون على المقياس الكبير. ليس علينا أن نزعج أنفسنا الآن بكيفية تشكيل الكواكب بالضبط أو كيف نشأت الحياة بالضبط؛ فإننا نعرف ما يحدث إذا كان لديك مصدراً لذرات العناصر الأربعة (الكربون والهيدروجين والأكسجين والنتروجين)، وكوكب مثل الأرض. ولكن هل نعرف من أين أتت المادة التي صُنعنا منها، والتي تهيمن عليها ذرات العناصر الأربعة؟ لو عرفنا ذلك سوف نفهم الطريقة التي تعمل بها النجوم، ونبدأ بنجم مثل الشمس.

الفصل الثالث

النجوم شموس

بالنسبة لمعاني مصطلحات مثل "الذرة" و"النواة"، وضعت في اعتباري ضمناً أن أي قارئ لهذا الكتاب يعرف على الأرجح أن الشمس نجم، وأن السبب الأساسي لظهورها كبيرة وساطعة في السماء، مقارنة بالضوء الضئيل للنجوم الأخرى، أنها أقرب إلينا بكثير. ولم يكن ذلك واضح دائماً، ففي العصور القديمة كان يُنظر فعلاً إلى النجوم على أنها نقاط ضوئية - أي فجوات بالغة الصغر في غلاف كروي من المادة السوداء التي تحيط بالأرض - يمكننا أن نرى من خلالها الضوء الآتي من خلفها. ولم تكن تلك الفكرة غريبة تماماً في ذلك الوقت، لسببين: الأول أن النجوم تبدو ثابتة في الأماكن نفسها بالنسبة لبعضها البعض في السماء، فتظهر على هيئة تشكيلات من أبراج. فكان من المعقول أن ينظر إليها على أنها قد تكون مثبتة على هيكل ما يدور حول الأرض. والسبب الثاني الذي ساهم في وجود هذا التفسير أنه لم يكن هناك الكثير جداً من هذه النجوم المرصودة؛ ففي السماء كلها ليس هناك سوى نحو ستة آلاف نجم يمكن رؤيتها بالعين المجردة، حتى لو لم يكن هناك ضوء صناعي (أو ضوء قمر) يبهر النظر. وقد تظن أن هذا يعني أنه يمكن رؤية ثلاثة آلاف نجم في أي لحظة خلال أية ليلة، حيث يكون نصف السماء هو المرئي فقط في أي وقت، لكن النجوم الخافتة المنخفضة على الأفق تكاد تختفي في السديم، والتلال والأشجار التي تحجز جزء من المنظر، والرقم الأكثر واقعية أنه يمكن رؤية نحو ألفي نجم فقط في أي وقت عندما تكون السماء خالية ومظلمة. وكانت هذه الأرقام معقولة بالنسبة للمقاييس البشرية وساهمت في النظر إلى النجوم على أنها شيء يتسق مع التصور الإنساني

وظل هذا التصور عن ستة آلاف نقطة ضوئية في الكرة السماوية مهيمنًا خلال آلاف من السنوات. ولم يبدأ هذا الوضع في التغير سوى في بداية القرن السابع عشر، عندما وجه جاليليو تلسكوبه نحو مجرة درب اللبَّانة واكتشف أنها تتكون من عدد لا يحصى من النجوم المستقلة، التي تظهر معًا للعين المجردة على هيئة سحابة بيضاء واحدة.

والمهم هنا أن التقنية دخلت في قصتنا في بداية البحث العلمي عن النجوم. ولم يصبح من الممكن حدوث تقدم في علم الفلك ودراسة النجوم إلا بمساعدة التقنية. وبغض النظر عن مدى ذكائك أو سلامة أفكارك النظرية، لا تأمل في معرفة أي الأفكار أكثر ذكاء أو صحة وتحتاج مزيدًا من البحث، أو أيها خاطئ ويجب طرحه جانبًا، إذا لم يكن لديك طريقة لاختبار هذه الأفكار بمقارنتها بما تلاحظه عمليات الرصد. وهذا هو السبب الذي جعل القدماء يعتقدون أن الظاهرة التي يرونها في السماء قد تكون من فعل الآلهة بالفعل، أي ظاهرة سماوية. ومن بين مثل هذه الحكايات المتعددة حول أصل مجرة درب اللبَّانة نفسها جاءت الحكاية التي أعطت هذه المجرة اسمها الحديث من الميثولوجيا الإغريقية، التي وصفت شريط الضوء الأبيض الذي يظهر في السماء بأنه لبن سكب من صدر الآلهة جونو [٢٣] عندما كانت تُرضع طفلها هرقل [٢٤]. ولا يعود عدم تبني الإغريق القدماء (ونظراؤهم في الثقافات الأخرى) مثل هذه الأفكار إلى أنهم كانوا أقل ذكاء من علماء الفلك المحدثين، ولكن السبب أنه كان لديهم معلومات أقل بكثير للاعتماد عليها. وتؤكد أفكار الفيلسوف الإغريقي ديموقريطس، الذي عاش في القرن الخامس قبل الميلاد (أي نحو ألفي سنة قبل جاليليو)، على مدى ذكاء بعض القدماء، حيث كان يرى أن درب اللبَّانة يجب في الواقع أن يحتوي على أعداد لا تحصى من النجوم، كل منها خافت جدًا بحيث لا يظهر وحده، ولكنها تنضم مع بعضها لتصبح شريطًا ساطعًا في السماء.

(٢٣) جونو Juno : ملكة السماء في أساطير الرومان (المترجم).

(٢٤) هرقل Hercules : بطل جبار من أبطال الميثولوجيا الإغريقية (المترجم).

وكان ديموقريطس أيضًا ممن اقترحوا مبكرًا النظرية الذرية (أو الفرضية الذرية، [كما] كان يُطلق عليها حينئذ - فالنظرية تعتبر فرضية تم اختبارها بالتجربة والمشاهدة، [وثبتت] صحتها من خلال هذه التجارب). لكن لم يكن لديه في كلتا الحالتين طريقة لاختبار أفكاره حيث كانت تنقصه التقنية اللازمة. وظلت أفكاره مجرد فرضيات، وليس نظريات، حتى تم ابتكار التقنية التي تختبرها. ولو كان ديموقريطس قد عاش ومارس [عمل]ه في النصف الثاني من القرن السادس عشر لكان له الأثر العميق في تطوير العلم [كما] فعل جاليليو، الذي أورد ما يلي في كتابه "المرسال النجمي" (الذي نُشر في ١٦١٠)

لقد رصدت طبيعة ومادة درب اللبَّانة باستخدام التلسكوب الذي أنعمت به النظر بشكل مباشر مع التأكد بالعين من أن كل المجادلات التي حيرت الفلاسفة خلال عدة عصور قد تم حلها، وأننا تحررنا أخيرًا من الجدل حولها. والمجرة [٢٥] هي في الواقع ليست غير مجموعة من نجوم لا تُحصى متجمعة معًا على هيئة عناقيد. وأينما تم توجيه التلسكوب، يظهر للنظر فورًا تجمع ضخم من النجوم، وكثير منها كبير نسبيًا وساطع جدًا، بينما تلك النجوم الأصغر لا يمكن إحصاؤها.

ويمكننا بالتقنيات الحديثة - التلسكوبات الحديثة - أن نتجاوز إنجازات جاليليو وبحساب عدد النجوم في جزء صغير من مجرة درب اللبَّانة الذي يتكرر ليغطي المساحة التي يشغلها كل درب اللبَّانة في السماء، يقدر علماء الفلك الآن عدد النجوم في مجرتنا بنحو ٢٠٠ مليار نجم، وهو رقم بعيد تمامًا عن عالم الخبرة البشرية في الحياة اليومية.

وبعد مائة عام من اكتشافات جاليليو تم القضاء نهائيًا على الأساس الآخر لمفهوم الفطرة الشائعة حول النقاط المضيئة التي تعتبر فتحات في كرة صلبة تحيط بالأرض.

وكلفت الجمعية الملكية إدموند هالي، وقد تسمى باسمه مذنب مشهور، بتجهيز قائمة جديدة للنجوم باستخدام بيانات عمليات الرصد الذي قام بها جون فلامستيد [٢٦]

(٢٥) المجرة galaxy هي الكلمة اليونانية للتعبير عن الدرب اللبني milky way.

(٢٦) كان هذا الأمر محل نزاع قاس في ذلك الوقت، حيث كان فلامستيد يعترض بشدة على من يستخدم بياناته، لذا لن نزعج أنفسنا هنا بالمشاحنة التي نتجت عن ذلك.

أول عالم فلك ملكي. وخلال هذا العمل قارن هالي البيانات من القائمة التي صنفها هيبارخوس [٢٧] في القرن الثاني قبل الميلاد بتلك البيانات الجديدة. وبالطبع وضع فلامستيد مزيداً من النجوم الكثيرة على القائمة، لكن قائمته احتوت على النجوم الساطعة التي درسها هيبارخوس. ووجد هالي أن البيانات تتوافق في معظم الحالات بين القائمتين، مما يوضح أن الإغريق القدماء كانوا ملاحظين مهرة قاموا بقياس مواقع النجوم في السماء بشكل دقيق. ولكن في حالات قليلة فقط كانت هناك فروق ملفتة للنظر بين مواقع النجوم كما حددها هيبارخوس ومواقع النجوم نفسها التي تم رصدها في القرن الثامن عشر. ولم يكن هناك مهرب من النتائج، لقد انتقلت بعض النجوم في السماء خلال القرون الواقعة بين الرصدين. ولم تكن ثابتة أبداً بالنسبة لإطار واحد لكنها تتحرك بالنسبة لبعضها البعض.

ومع ذلك فإنه كان من المعتقد في ذلك الوقت أن النجوم عبارة عن شموس أخرى. ولقد حاول عدد من علماء الفلك، ما بين زمن جاليليو وهالي، تقدير المسافات بين النجوم، باعتبار أن كل النجوم لها السطوع نفسها مثل الشمس، ولا تبدو خافتة إلا بسبب بعدها عنا. وإضافة إلى أشياء أخرى، يمكن أن يكون معنى ذلك أن النجوم الأكثر خفوتاً يجب أن تكون أكثر بعداً عن النجوم الأكثر سطوعاً. من هنا فمن المتوقع ألا تكون مرتبطة بالكرة البللورية نفسها حول الأرض – لكن فكرة الكرة البللورية كانت قد تحطمت فعلاً بواسطة اكتشافات جاليليو. وكان إسحاق نيوتن أحد الذين حاولوا استخدام هذه التقنية، وهو الذي قام بحسابات حول أنه إذا كان نجم الشعرى اليمانية له فعلاً سطوع شمسنا نفسه، فلا بد أن يكون على مسافة أبعد من الشمس بالنسبة إلينا ويبلغ ذلك نحو ضعف القيمة المقدرة حديثًا فقط لمسافة الشعرى اليمانية، ويعطيك شعوراً حقيقيًا بنوع المسافة التي عليك أن تقطعها لتصل إلى أقرب النجوم إلينا. وإذا نظرنا إلى هذا الأمر من منظور مختلف بعض الشيء، فإن الشعرى اليمانية بعيد عنا جداً حتى أن الضوء يحتاج إلى ٨,٦ سنة ضوئية لقطع المسافة من الشعرى اليمانية

(٢٧) هيبارخوس Hipparchus: عالم فلك يوناني من القرن الثاني قبل الميلاد وضع أول خريطة للسماء – المترجم.

إلى الأرض (من هنا فإن الشعرى اليمانية يبتعد عنا بمقدار ٨,٦ سنة ضوئية)، ويحتاج الضوء إلى ٨,٣ دقيقة فقط لقطع المسافة بين الشمس والأرض (أي أننا نبعد عن الشمس بمقدار ٨,٣ دقيقة من الشمس)، ومن المعروف أن سرعة الضوء ٣٠٠٠٠٠ كم/ثانية.

ولم يتوصل علماء الفلك إلى معرفة المسافات الحقيقية للنجوم إلا في ثلاثينيات وأربعينيات القرن التاسع عشر، (فقط) عندما أصبحوا قادرين على قياس بعض هذه المسافات مباشرة، باستخدام وسيلة هندسية يُطلق عليها اسم تقنية اختلاف المنظر [٢٨]. وتكون النجوم الأقرب إلينا على درجة كافية من القرب حتى أنها تبدو مزاحة في السماء بمقدار ضئيل، مقارنة بالخلفية الأكثر بعداً المتكونة من النجوم الثابتة، كلما دارت الأرض في مدارها حول الشمس. ويتم قياس موقع نجم ما بالنسبة لخلفية المجموعات الشمسية بشكل دقيق جداً عبر فترات زمنية كل ستة أشهر، عندما تكون الأرض على الجانبين المتضادين من مداره حول الشمس. ويطلق على الإزاحة الظاهرية لموقع النجم الجاري دراسته اختلاف المظهر النجمي، وتُقاس بعدد الثواني في القوس. وبالنسبة لأقرب النجوم تصل الإزاحة المقاسة، أو اختلاف المظهر، إلى بضعة أجزاء من عشرة من الثانية في القوس، وهو ما يناظر مسافات تصل إلى عشر سنوات ضوئية. وحتى نتصور مهارة علماء الفلك الذين كانوا أول من قاس اختلافات المظهر هذه، علينا أن نعرف أن الحجم الزاوي للقمر البدر في السماء ليلاً يصل إلى نحو ٣٠ دقيقة من القوس. ويصل أكبر اختلاف مظهر نجمي تم قياسه، الذي يناظر إزاحة نجمية ظاهرية في المسافات، إلى نحو واحد من ستون من واحد في المائة من هذا الحجم الزاوي للبدر في السماء.

(٢٨) اختلاف المنظر parallax: تغيير واضح في اتجاه جسم ناتج عن تغيير في الوضع المتعلق بالمشاهدة أو المراقبة التي توفر رؤية جديدة. ويحدث تغيير في مكان الراصد بالنسبة لجرم سماوي معين بواسطة دوران الأرض وحركة الأرض حول الشمس وحركة الشمس ومعها مجموعة الكواكب بالنسبة للنجوم القريبة. ونتيجة لهذه المتغيرات الدائمة في مكان الراصد فإن مساقط الأجرام السماوية على السماء تختلف باستمرار. ويسمى ما ينتج عن ذلك من اختلاف في المكان بحركة اختلاف المنظر (المترجم)

وحتى فى عام ١٩٠٠، كان قد تم قياس اختلاف المظهر لعدد ٦٠ نجم فقط. ولو كانت هذه هى الطريقة الوحيدة التى يستطيع علماء الفلك بواسطتها قياس المسافات النجمية مباشرة، لكان مازال لديهم فكرة ضئيلة جداً عن طبيعة الأنواع المختلفة للنجوم وكيفية عملها. ولكن هناك تقنية هندسية أخرى لقياس المسافات النجمية قادت علماء الفلك بعيداً بدرجة كافية فى الكون لكى يصبحوا قادرين على فهم طبيعة الأنواع المختلفة من النجوم. وهى تقنية مناسبة لعناقيد النجوم، وهى مجموعات من النجوم تتحرك معًا فى الفضاء، مثل فوج من الأسماك تسبح فى الاتجاه نفسه فى البحر، لكنها لا تُطبق إلا على العناقيد القريبة بما يكفى لرصد حركتها. ويلتقط علماء الفلك صوراً فوتوغرافية العناقيد خلال فترتين زمنيتين تفصل بينهما عدة سنوات (أو عقود)، ويقارنون بين مواقع النجوم فى الصورتين.

وفى واقع الأمر تدور مجموعة النجوم التى تتحرك فى الاتجاه نفسه، عبر خطوط متوازية، مثل كل السيارات التى تنطلق على طريق بالغ السرعة يتكون من ثمان مجازات. ومن منطقة الرؤية إلى الطرف البعيد تبدو مجازات الطريق كما لو كانت تتجمع عند نقطة على بعد، وهى "نقطة التلاشى"، التى تتجه كل السيارات نحوها. وبالطريقة نفسها، يُظهر قياس حركة نجوم العنقود النجمى عبر السماء، خلال عدد من السنوات، أنها تبدو جميعها متجهة نحو نقطة معينة فى السماء (وتكون كل نقطة مختلفة لكل عنقود بالطبع).

ويمكن لعلماء الفلك، فى الوقت نفسه، قياس سرعة النجوم خلال الفضاء. ومن السهل قياس مدى سرعة حركتها عبر خط الرؤية (إذا كان لديك الصبر الكافى أو كان لديك تسجيلات قديمة حول المكان الذى تحتله النجوم عادة). وتنبئ هذه الحركة الزاوية عن بعد النجم، إذا كنت تعرف سرعته الفعلية فى الفضاء. وكلما كان النجم أعلى سرعة كلما بعدت إزاحته فى الفضاء، خلال عقد واحد، أو قرن واحد، ولكن كلما زاد بعده كلما قلت حركته عبر الفضاء. وبالطبع قد يكون النجم أيضًا فى حالة حركة مقتربًا منا أو مبتعداً عنا، عبر خط الرؤية. ولحسن الحظ أنه من السهل قياس مُركّب السرعة هذا، باستخدام ظاهرة دوبلر.

وظاهرة دوبلر – التى تنبأ بها كريستيان دوبلر فى عام ١٨٤٢، وأصبحت وسيلة فلكية مفيدة فى النصف الثانى من القرن التاسع عشر، عبارة عن تغير فى طول موجة الضوء ناتج عن حركة مصدر الضوء فى الفضاء، وهو يقترب من الراصد أو يبتعد عنه. يمط الأجرام التى تبتعد الضوء إلى طول موجة أكثر طولاً (مثل مط زنبرك)، وحيث إن الضوء الأحمر له طول موجة أكثر طولاً من الضوء الأزرق يطلق على هذه الظاهرة الإزاحة الحمراء. والأجرام التى تتحرك تجاهنا تحشر أطوال موجات الضوء الصادرة عنها فى بعضها البعض (مثل الضغط على زنبرك)، فتنتج إزاحة زرقاء. وبقياس مقدار الإزاحة الحمراء أو الزرقاء فى الضوء الآتى من نجم يمكنك قياس سرعته (سرعته الحقيقية فى الفضاء) عبر خط الرؤية. لكننا نعرف الاتجاه الفعلى الذى تسير عليه النجوم، من ظاهرة الخطوط المتلاشية. وفى كل حالة، ولكى يكون الأمر متسقًا، ستكون هناك سرعة واحدة حقيقية فقط فى الفضاء عبر خط الرؤية تنضم إلى تلك السرعة التى تم قياسها عبر خط الرؤية للحصول على السرعة الكلية للنجم تلك التى تتسق مع حركة العنقود النجمى نحو نقطة محددة فى السماء، ينطلق العنقود كله تجاهها. ويمكن فى هذه الحالة مقارنة السرعة الحقيقية للنجم عبر خط الأفق، التى تم التوصل إليها بهذه الطريقة، بالمعدل الزاوى الذى ترى حركته من خلاله من الأرض لنعرف كم يبعد عنا حتى تنتج عنه هذه الحركة الزاوية عبر خط الرؤية.

ولقد شرحت هذا ببعض التفاصيل، لأنه خطوة مهمة جداً فى كل ما يلى. ليس عليك أن تكون قادراً على عمل الحسابات بنفسك، لكن يجب أن تكون لديك الثقة فى أن لدى علماء الفلك طريقة لقياس المسافات بيننا وبين عناقيد النجوم القريبة – أو على الأقل بيننا وبين عنقود نجمى محدد. وتعطى هذه الطريقة التى يُطلق عليها طريقة العنقود المتحرك قياسات مسافة يعول عليها لعنقود محدد يطلق عليه حشد القلاص [٢٩]، الذى يقع فى برج الثور. ويحتوى القلاص على أكثر من مائتى نجم

(٢٩) القلاص Hyades : حشد نجومى يشاهد بالعين المجردة بجوار النجم الفا الثور (الدبران) (المترجم).

وينتشر عبر مجال صغير من الفضاء على بعد نحو ١٥٠ سنة ضوئية منا. وهي بعيدة جداً حتى أن المسافة بين أحد جوانب الحشد إلى الجانب الآخر يمكن إهمالها ، وعلى وجه التقريب يمكن اعتبار كل نجوم القلاص كما لو كانت على البعد نفسه منا. لكن لها درجات سطوع متنوعة جداً، لهذا فهي بالفعل ذات درجات سطوع مختلفة – وليس هذا وهماً ناتجاً عن أن بعض النجوم أقرب إلينا من غيرها – وحيث إنك تعرف المسافات إلى كل من هذه النجوم وسطوعها الظاهرى، يمكنك معرفة سطوعها الحقيقى (أو إشراقاتها الفعلية (intrinsic luminosities، مقارنة بالشمس. وهذا هو نوع المعلومات الذى نعرف من خلاله أن للشمس سطوعاً يقع تقريباً فى منتصف نطاق السطوعات النجومية، وتعتبر لهذا السبب نجماً متوسطاً (ومن جانب آخر فإنها أكثر سطوعاً من السطوع المتوسط، حيث يوجد الكثير من النجوم الأكثر خفوتاً مقارنة بالنجوم الساطعة). وحتى هذا الجزء من المعلومات لم يعرف بشكل مؤكد إلا منذ النصف الثانى من القرن التاسع عشر – بالكاد أكثر من مائة عام.

وتُعرف مسافات حشود النجوم الأخرى، الأبعد بكثير من حشد القلاص، بطرائق متنوعة. فإذا عرفنا أن أنواعاً معينة من النجوم، يتم تمييزها بألوانها، لها جميعاً سطوعاً فعلياً، يمكن استخدامها هى نفسها كمؤشرات عن المسافة (وهو ما يطلق عليه علماء الفلك "الشموع القياسية")، بمقارنة سطوعها الظاهرى بالسطوع الفعلى المتوقع. وأفضل مؤشرات مسافة من هذا النوع هى النجوم التى تتنوع بطريقة خاصة مميزة (مما يجعل من السهل رصدها)، والتى يكون لها جميعاً السطوع نفسه تقريباً بالنسبة لبعضها البعض (وهذا ما يجعلها شموعاً قياسية قياسية). فإذا وجدنا أحد هذه النجوم المعروفة باسم RR Lyrae، فى مجموعة نجوم، يمكننا استخدامها لحساب المسافة إلى هذه المجموعة، قبل مواصلة العمل على مقارنة كل نجم فى المجموعة على حدة بالنسبة للنجوم الأخرى لمعرفة مدى اختلافها فى الإشراق الفعلى. عندئذ يمكنك بالطبع مقارنة مجموعة نجوم كاملة بغيرها من المجموعات، لمعرفة المزيد أيضاً حول التشابهات والاختلافات بين النجوم.

وهناك نوع آخر من النجوم المتغيرة يُسمى كوكبة الملتهب [٣٠] ، يفيد فى حساب المسافات إلى المجرات الأخرى، ما بعد مجرة درب اللبَّانة. ولسنا فى حاجة بعد إلى الذهاب فيما وراء درب اللبَّانة. وطرائق حساب المسافات التى قدمتها هنا كافية لتوضيح أن درب اللبَّانة فى مجمله هو منظومة على هيئة قرص طولها نحو ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية وسمكها نحو ١٠٠٠ سنة ضوئية، تحتوى على نحو ٢٠٠ مليار نجم (ولم يبدو ذلك بهذا الوضوح إلا فى العشرينيات، أى أطول قليلاً من عمر فرد بشرى). ويقع الشمس فى هذا القرص، حيث تبتعد عن المركز بنحو ثلثى مسافة المركز عن طرف المجرة، وتدور حول مركز المجرة تماماً كما تدور الكواكب حول الشمس. ويقترب العدد الكلى للنجوم فى المجرة من عدد حبات الأرز التى يمكن وضعها فى كاتدرائية، وإذا نُثرت بطريقة معينة للحصول على نموذج قياسى لمجرة درب اللبَّانة بالنسب الصحيحة، سيصل قطر هذا النموذج إلى ٤٠٠٠٠ كم، وهى المسافة نفسها تقريباً بين الأرض والقمر.

ونعرف من خلال المسافة الإشراق الفعلى للنجوم، وهو نصف ما نود معرفته عن طبيعة النجوم. والنصف الثانى من هذا الموضوع يتعلق بالكتل. وهناك فى الواقع طريقة واحدة يمكننا من خلالها تحديد كتل النجوم بشكل دقيق، وذلك إذا استطعنا أن نرصد نجمين فى منظومة ثنائية يدوران حول بعضهما البعض، مثل الأرض والقمر اللذان يدوران حول بعضهما. وبعد تطوير جاليليو للتلسكوب الفلكى، لاحظ علماء الفلك أزواجاً من النجوم قريبة من بعضها البعض فى السماء. ولم يجد جديد إلا فى عام ١٧٦٧ عندما توقع البريطانى متعدد الثقافات جون ميشيل (وهو بالمناسبة أول من اكتشف الثقوب السوداء)، أن يكون بعض هذه الأزواج نجوماً تصاحب بعضها البعض بالفعل، وليس مجرد تقارب بالصدفة ناتج عن أن أحد النجوم قريب منا والآخر أكثر بعداً ويبدوان متقاربان فقط على خط الرؤية، أى ما يشبه ما يحدث فى وقت محدد من الليل عندما نرى القمر "تابع" لنجم معين. وتم إجراء أول رصد تصنيفى لهذه النجوم

(٣٠) النجوم المتغيرة variable stars: هى نجوم ثوابت يتغير لمعانها مع الزمن بشدة. كوكبة الملتهب Cepheid مثلها مثل نجوم دلتا قيفاوس المتغيرة – المترجم

الثنائية في الربع الأخير من القرن التاسع عشر بواسطة وليام هيرشيل، وفسّر رصده سبب إزاحة بعض هذه النجوم حول بعضها البعض بدرجة ملحوظة خلال عشرين سنة تقريباً. مما أتاح دليلاً على أن هذه المنظومات يجب، حسب كلماته، أن تكون "تجمعات ثنائية حقيقية لنجمين، مترابطين تماماً ببعضهما بأربطة الجذب المتبادل".

وفي القرن التاسع عشر أصبحت دراسة النجوم الثنائية موضوعاً مهماً في علم الفلك، والسبب على وجه التحديد هو إمكانية معرفة عنصري كتلة نجم ثنائي بالحصول على تفاصيل حركة النجمين كل منهما حول الآخر. ومن دراسة مدارات كواكب المجموعة الشمسية، وباستخدام قانون نيوتن للجاذبية وقوانين الحركة (التي تم نشرها في كتابه العظيم "برنسيبيا" في ١٦٨٧)، عرف علماء الفلك بوجود معادلتين بسيطتين تنطبقان على مدارات المنظومات الثنائية. وتربط إحدى المعادلتين بين المسافة بين عنصري المنظومة الثنائية وكتلتهما معاً (كتلة النجم "أ" مضاف إليها كتلة نجم "ب"). وتربط المعادلة الثانية بين بعد كل نجم عن مركز كتلة المنظومة الثنائية (أي نقطة توازنها، إذا فضلت هذا التعبير)، ونسبة كتلتي العنصرين (كتلة النجم "أ" مقسومة على كتلة النجم "ب"). وبمجرد معرفتك بالكتلة الكلية والنسبة بين الكتلتين، لا يحتاج الأمر سوى دقيقة لتحصل على الكتلتين الفعليتين النجمين.

وبالطبع ليس الأمر بهذه البساطة في الممارسة - ولا يكون كذلك أبداً في علم الفلك - فعليك أن تدرس الأزواج الثنائية لعدة سنوات، أو حتى عدة عقود، حتى تستطيع الحصول على تفاصيل دقيقة عن المدارات، وأن تضع في اعتبارك اتجاه المدار في السماء (ما إذا كنا نراه على الأفق أو في المواجهة أو بينهما؟). ويمكنك تصور مدى الجهد المضني الذي احتاجه التقدم البطيء في هذا المجال إذا عرفت أنه حتى في عام ١٩٢٤، عندما جمع الرائد في الفيزياء الفلكية آرثر إدنجتون كل المعلومات المتاحة وسجلها على هيئة نقاط في شكل بياني يعطي علاقة بين سطوع نجم (السطوع المطلق، بالنسبة للنجوم المعروف بعدها عنا) والكتلة، لم يجد لديه سوى عدد قليل من كتل النجوم المحددة بدقة لكي يستخدمها في حساباته. ولكن ذلك كان كافياً لتوضيح أمرين أن هناك تنوع في الكتل النجمية حيث تتراوح ما بين خمس الكتلة الشمسية [٣١]

(٣١) طريقة مناسبة للتعبير عن كتل النجوم باعتبار كتلة الشمس وحدة واحدة.

ونحو ٢٥ كتلة شمسية، وأهم ما في الموضوع أن كتلة نجم ما ترتبط بسطوعه بطريقة بسيطة جداً.

وبشكل عام، فإن النجوم الأثقل تكون أكثر سطوعاً من النجوم الأقل ثقلاً. وبشكل أكثر تحديداً فإنه في حالة النجوم التي تشبه الشمس إلى حد كبير (التي تتراوح كتلتها بين ٠,٢ و٧ كتلة شمسية) يتناسب السطوع المطلق لنجم ما مع كتلته مرفوعة للقوة الرابعة (ك^٤)، لذلك فإن مضاعفة كتلة النجم تجعل سطوعه يرتفع ستة عشر مرة، بينما يتناسب السطوع المطلق في حالة النجوم الأكثر ضخامة مع مكعب الكتلة (ك^٣)، أي أن مضاعفة كتلة النجم لا ترفع سطوعه "سوى" ثمان مرات. وكما سنرى فإن هذه العلاقة البسيطة بين الكتلة والسطوع تعطي فكرة مهمة عن طريقة استمرار تألق النجوم بتوليد حرارة من داخلها. ولقد تم التوصل إلى هذه الاكتشافات العلمية الأولى حول طبيعة النجوم في منتصف العشرينيات - حيث يعتبر علم الطبيعة الفلكية علماً ينتمي للقرن العشرين. ويلفت النظر من جديد إلى أنه بسبب الارتباط الشديد بين التقدم في العلم والتقدم في التقنية: فإن علماء الفلك لم يستطيعوا التوصل إلى طبيعة النجوم حتى توافرت لديهم الأدوات اللازمة لذلك. وكان هناك تطوران مهمان في القرن التاسع عشر مهدا الطريق لأمثال إدنجتون للتوصل إلى مجرد معرفة الطبيعة المميزة لنشاط النجوم.

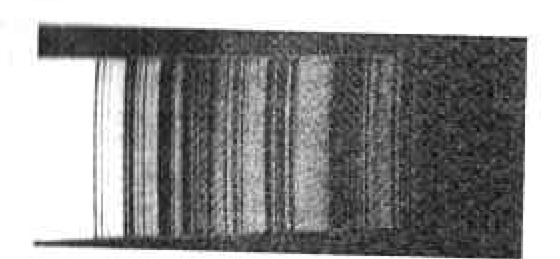
وأول تطور مهم نراه الآن شائعاً في الحياة اليومية حتى يصبح من الصعب تصوره على أنه ثورة علمية - لكنه كان كذلك. لقد تم ابتكار التصوير الفوتوغرافي في نهاية ثلاثينيات القرن التاسع عشر، وتم تطبيقها فوراً (بشكل محدود) في مجال علم الفلك. وكان سطوع الشمس سبباً في أن تكون جرماً مثيراً للانتباه بالنسبة للمصورين الفوتوغرافيين، وتم الحصول على أول صورة بالتصوير الدغرى [٣٢] يتضح فيها قرص الشمس بواسطة عالما فيزياء في باريس في ١٨٤٥، ومع تطور التصوير الفوتوغرافي في النصف الثاني من القرن التاسع عشر، أصبحت الألواح المستخدمة على درجة كافية من الحساسية (بدرجة كافية من "السرعة"، باصطلاحات المصورين

(٣٢) التصوير الدُغرى daguerreotype : هو نوع قديم من التصوير الفوتوغرافي باستخدام لوح من الفضة حساس للضوء.

الفوتوغرفيين) لالتقاط صور النجوم من خلال التلسكوبات ليلاً. وكان لذلك آثار علمية بالغة، الأول، حتى بالنسبة لدراسات بسيطة مثل استكشاف النجوم الثنائية، أن علماء الفلك لم يعودوا يعتمدون على الرسومات لمقارنة مدارات النجوم من عام لآخر، أو من عقد إلى آخر. وكان هناك دائمًا شك مزعج من أن يكون قد تم عمل القياسات والرسومات الأقدم التى تعود إلى أشخاص آخرين، بشكل غير دقيق. ومع ظهور التصوير الفوتوغرافى تم التخلص من هذا النوع من الشك. والثانى أنه مع توافر مستحلبات التصوير الفوتوغرافى الأكثر سرعة والأكثر قدرة على التقاط مزيد من التفاصيل، أصبح فى استطاعة الصور الفوتوغرافية إظهار النجوم والأجرام السماوية الأخرى الأكثر خفوتًا التى لم يستطع الإنسان أبدًا رؤيتها بالعين المجردة، حتى باستخدام تلسكوب.

عندما تنظر إلى شىء، حتى ولو من خلال تلسكوب، تصبح العين الإنسانية بعد قليل مشبعة، ولا تستطيع رؤية ما هو أكثر خفوتًا عن سطوع معين. وإذا لم تر نجم خافت بطريقة مباشرة، عندئذ (إذا اعتبرنا عينيك متكيفتين مع الظلام) لن تراه بالمرة، حتى لو قضيت ساعات تحملق من خلال تلسكوب. أما بالنسبة للصور الفوتوغرافية، فإن كل جزء ضئيل من الضوء يسقط على اللوح الفوتغرافى، أو الفيلم، يُضاف إلى الضوء السابق عليه. وكلما طال وقت تعريض الصورة الفوتوغرافية، كلما تم التقاط الأجرام الأكثر خفوتاً. وبالفعل لقد أدى ذلك إلى ظهور كون جديد قابل للدراسة. ولم يكن هذا أهم ما قدمه التصوير الفوتوغرافى الفلكى، ولقد جاء أهم نجاح فى هذا المجال، القاعدة الأساسية التى قامت عليها الفيزياء الفلكية، من الجمع بين بينه وبين اكتشاف علمى آخر مهم فى منتصف القرن التاسع عشر تطور علم الأطياف. ويمكن أيضًا استخدام علم الأطياف، الذى يقوم على تحليل الضوء القادم من جرم كالنجم الحصول على معلومات حول طبيعة مادة الجرم السماوى الذى يبث الضوء (أو فى حقيقته الغاز الذى يمتص الضوء)، بناء على ظاهرة دوبلر، للحصول على معلومات حول طبيعة حركة الجرم. وبدون هذين النوعين من المعلومات لم يكن ليوجد فى الحقيقة علم الفيزياء الفلكية بالمرة.

ويشتق اسم "علم الأطياف "spectroscopy" من كلمة "الطيف "spectrum" - قوس قزح المألوف بضوئه الملون الذى تراه عندما يمر الضوء الأبيض خلال منشور (أو فى قوس قزح الذى يظهر فى السماء). وكما هو الأمر بالنسبة لكثير من جوانب الفيزياء، كان إسحاق نيوتن هو أول من درس الطيف بشكل صحيح، وقال إن الضوء الأبيض مزيج من الألوان المختلفة يمكن فصلها بالمنشور (إلى الأحمر والبرتقالى والأصفر والأخضر والأزرق والأرجوانى والبنفسجى)، وإنه إذا تم جمع هذه الألوان مع جديد فى شعاع ضوء واحد فإنه ستبدو من الجديد كضوء أبيض. ونحن نفسر هذه الظاهرة فى الوقت الراهن باستخدام تغيرات طول موجة الضوء. فالضوء الأحمر هو الأطول فى طول الموجة مقارنة بألوان الطيف الأخرى، والبنفسجى أقصر الأطوال الموجية. وأهم ما فى هذا الموضوع أن كل طول موجة (كل لون) ينحرف بزاوية مختلفة عند مروره بالمنشور، لذلك فإن الألوان (التى تمتزج كلها معًا فى ضوء أبيض) تنتشر خلال الطيف. ومن جانب ما، يدور علم الأطياف حول تحليل لون الضوء من مصادر مختلفة - لكنه يقوم بذلك من خلال تفاصيل أكثر كثيرًا من مجرد النظر إلى الألوان المألوفة فى قوس قزح.



الشكل (٣ - ١) خطوط الطيف. وفى هذا الطيف يكون شكل الخطوط (شفرة الخطوط العمودية الكونية) واضحًا. الأطوال الموجية الأقصر (المناظرة للضوء الأزرق) موجودة على اليمين، والأطوال الموجية الأطول (الضوء الأحمر) على اليسار.

وعند تكبير شكل قوس قزح الناتج عن الضوء الذي يمر في منشور، يتضح وجود كثير من الخطوط الحادة، ساطعة أو مظلمة، في الطيف. وكان أول من لاحظ ذلك، في بداية القرن التاسع عشر، عالم الفيزياء الإنجليزي وعالم الكيمياء وليام وولاستون، الذي مرر ضوءاً صادراً من الشمس خلال منشور ورأى كثيراً من الخطوط المظلمة في الطيف الذي تم تكبيره. لكن لم يتابع هذا الاكتشاف وتوفي في ١٨٢٨، تاركاً للآخرين القيام بمزيد من تطوير هذا الاكتشاف. وبعد وقت قصير من اكتشاف وولاستون الخطوط الطيفية، لاحظ عالم الفيزياء الألماني جوزيف فون فرونهوفر أيضاً الخطوط المظلمة في طيف الشمس، وقام بدراسته في العقد الثاني من القرن التاسع عشر - لكنه مات قبل وفاة وولاستون بعامين، وكان على الجيل التالي للباحثين في المجال العلمي تطوير هذه الأفكار.

وحدث أهم تطور في ألمانيا بواسطة روبرت بنسن وجوستاف كيرشهوف، في خمسينيات وستينيات القرن التاسع عشر. وهو نفسه روبرت بنسن الذي ارتبط اسمه حالياً بمصباح بنسن، رغم أنه لم يخترعه ، والمصباح الأساسي ابتكره ميشيل فاراداي في لندن، وحسن التصميم بيرت ديسديجا مساعد بنسن، وسوقه تحت اسم بنسن. لكن العلاقة بين بنسن والمصباح مهمة وذات صلة بالموضوع الذي نناقشه، حيث إن الطيف الذي درسه بنسن وكيرشهوف كان يتم الحصول عليه عن طريق تسخين مواد مختلفة بالشعلة المباشرة لمصباح بنسن، مع تحليل الضوء الذي كانا يبثانه بواسطة منظار الطيف.

وفي طيف الضوء الآتي من الشمس أو من أي نجم آخر، تظهر الخطوط المظلمة بغزارة، بعضها يكون أقل سمكاً وبهوتاً، والآخر أكثر سمكاً وظلمة. وأحصى فرونهوفر ٥٧٤ خطاً في طيف ضوء الشمس، كل منها عند طول موجته الخاصة المحددة بدقة، ووجد كثيراً من الخطوط نفسها في الضوء الآتي من الزهرة (وهو مجرد ضوء شمس منعكس، لذلك ليس الأمر مثيراً لدهشة كبيرة) ومن كثير من النجوم (وهو أمر أكثر إثارة للاهتمام، حيث إنها تتألق نتيجة ضوئها الخاص) (٣٢). وتشبه الخطوط، بطريقة

(٣٢) باستخدام التقنيات الحديثة يمكن لعلماء الفلك تحديد أكثر من ١٥٠٠٠ خط على الطيف الشمسي.

مثيرة للدهشة تماماً، خطوط الشفرة العمودية المألوفة حالياً ، وتكون مميزة بشكل خطوط الشفرة العمودية، لأنها تنبئ بالضبط عن الجرم السماوي الذي أنتج الخطوط المكونة لها. وكان الاكتشاف المهم الذي أنجزه بنسن وتلميذه كيرشهوف أن كل عنصر يُنتج مجموعته الخاصة من الخطوط على الطيف، وتكون مميزة لا التباس فيها مثل البصمة. وعندما تكون المادة ساخنة فإنها تنتج خطوط بث لامعة، وعند مرور الضوء الأبيض خلال غاز بارد، تكون النتيجة طيفاً توجد فيه خطوط امتصاص مظلمة. ولكن بالنسبة لغاز معين (الهيدروجين مثلا) تظهر الخطوط اللامعة عندما يكون الغاز ساخناً، بالضبط في الأماكن نفسها على الطيف (أي يكون لها بالضبط الأطوال الموجية نفسها) وتُشاهد الخطوط المظلمة عندما يمر الضوء الأبيض خلال غاز بارد.

وينتج الضوء البرتقالي المميز الذي نراه في إضاءات الشوارع، مثلاً، عن الصوديوم في لمبات الضوء، التي يتم شحنها بالطاقة بواسطة التيار الكهربائي المار في اللمبة. ويشع الصوديوم الساخن طاقة عند طولي موجة محددين تماماً في الجزء الأصفر البرتقالي من الطيف، فيُنتج خطين لامعين أصفرين برتقاليين على الطيف، وهذا مثال مناسب بشكل خاص، حيث إن كيرشهوف حدد في ١٨٥٩ لأول مرة وجود أي عنصر خارج الأرض عندما عرف صفات خطوط الصوديوم (وكانت في هذه الحالة الخطوط المظلمة للامتصاص) على طيف الضوء الآتي من الشمس.

وبمجرد تقدير مدى العلاقة بين التركيب الكيميائي لمادة ما وطيفها، وبمجرد دراسة علماء الكيمياء لمواد كثيرة مختلفة بهذه الطريقة في المعمل، باستخدام حرارة مصباح بنسن للحصول على البصمات الطيفية العناصر المختلفة، يمكنهم التحديد الفوري (كما سبق أن أشرنا إلى اكتشاف الصوديوم في الشمس) للعناصر الموجودة في النجوم بتحديد الخطوط الطيفية في الضوء الآتي منها - على أن يكون للنجوم السطوع الكافي لطيفها حتى يمكن دراستها بهذه الطريقة. ويمكنهم استخدام هذه التقنية لمعرفة المواد التي صُنعت منها النجوم، رغم أن تفسير سبب أن لكل عنصر من العناصر المختلفة طيفه الفريد لم يأت إلا لاحقاً.

رغم أن درجة حرارة سطح الشمس تصل إلى نحو ٦٠٠٠° مئوية، تظهر الخطوط مثل غابة مظلمة في الطيف الشمسي، وليس على هيئة خطوط لامعة، لأن الغاز المسئول عن هذه الخطوط، فوق السطح المرئي للشمس تماماً، يكون أكثر برودة من السطح المرئي، ويمتص الطاقة عندما يعبره الضوء الخارج من الشمس.

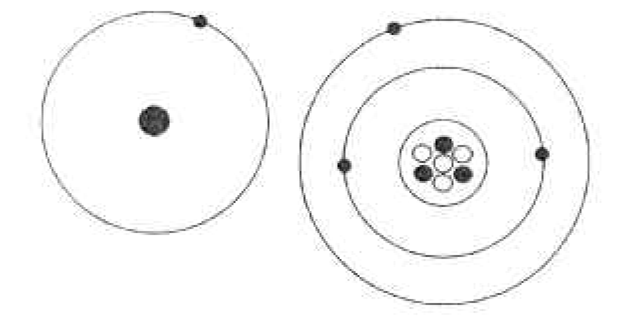
وأتاح لنا الجمع بين علم دراسة الطيف والتصوير الفوتوغرافي إمكانية معرفة تركيب النجوم. ويمر الضوء الآتي من نجم ما خلال التلسكوب ثم إلى منشور (أو في محزوز حيود الضوء [٣٤] ، الذي يقوم بالعمل نفسه)، حيث ينتشر على هيئة طيف بالغ الصغر يتم تصويره فوتوغرافياً مع تعريض زمني طويل للحصول على التفاصيل. وفي زمن مبكر كانت ممارسة هذا العمل صعبة إلى درجة لا يمكن تصديقها، حيث إن الضوء الخافت من نجم بمفرده يظل أكثر خفوتاً بعد انتشاره بهذه الطريقة، وكانت تقنيات التصوير الفوتوغرافي قادرة بالكاد على إعطاء طيف النجوم الأكثر سطوعاً. لكن الأمر سار على ما يرام، وبمرور العقود حصل علماء الفلك على أطياف الأجرام السماوية الأكثر خفوتاً فالأكثر خفوتاً.

ومن السمات المثيرة للانتباه في كل هذا العمل أن أحداً لم يكن يعلم في القرن التاسع عشر سبب وجود الخطوط في الأطياف. ولم يكونوا محتاجين لأن يعرفوا، لأنهم كانوا يعلمون أنك إذا نظرت إلى طيف الصوديوم، مثلاً، في المختبر فإنك ترى باستمرار الخطين نفسهما. وليس هناك أبداً ما ينتج عنه مثل هذين الخطين المميزين، عند هذين الطولين المميزين للموجة، لذلك فإنك عندما ترى هذين الخطين في ضوء قادم من الشمس، أو أي نجم آخر، تعرف أن الصوديوم موجود في هذا الجرم (أو على سطحه على الأقل). وينطبق هذا البرهان التجريبي على كل عنصر آخر.

وظهر تفسير سبب وجود الخطوط في بداية القرن العشرين، بعد ظهور النظرية الكمية. وهناك طريقة بسيطة لتصور هذا الأمر إذا تخيلنا أن الإلكترونات في ذرة ما

(٣٤) محزوز حيود الضوء: diffraction grating أداة تستخدم للحصول على الأطياف استناداً إلى ظاهرة حيود الضوء. والحيود تغير في اتجاه مجموعة الأمواج الضوئية أو كثافتها بعد مرورها عبر عائق – المترجم

تدور حول النواة بطريقة ما، مثلها مثل الكواكب التي تدور حول الشمس. فإذا قفز إلكترون ساقط من مدار إلى مدار آخر أقل طاقة (مثل القول بأن المريخ هبط إلى مدار الأرض)، فإنه يتم بث الطاقة على هيئة ضوء – كمية محددة من الطاقة، تناظر طول موجة ضوئية محددة، تتعين بالمسافة بين المدارين المسموح بهما للإلكترون (أو مستويا الطاقة). وتتكرر هذه النتيجة في الكثير والكثير من الذرات للعنصر نفسه، مما ينتج عنه خط لامع في الطيف، له طول موجي مناظر للفرق في الطاقة بين المدارين. بالطريقة نفسها فإنه إذا تم امتصاص كمية الطاقة نفسها بواسطة ذرة ما، يقفز إلكترون إلى مستوى طاقة أعلى (كما قد يكون القفز من مدار الأرض إلى مدار المريخ). ومع تكرار هذه العملية في المزيد والمزيد من ذرات العنصر نفسه ينتج خط مظلم في الطيف. ولكل نوع من الذرات مجموعته الفريدة من مستويات طاقة الإلكترون، لذلك فإن لكل عنصر



شكل (٣ – ٢) فسر نيلز بور وجود الخطوط على الطيف بتقديم نموذج للذرة حيث تدور الإلكترونات حول مركز النواة. فيماثل الخط الطيفي الحاد الطاقة المصاحبة لانتقال إلكترون من مدار إلى آخر – إذا قفز إلى الداخل فإن الطاقة الصادرة تصنع خطاً لامعاً، وإذا قفز إلى الخارج فإن الطاقة الممتصة تصنع خطاً مظلماً. والنموذج مجرد عمل تقريبي. والمهم في ذلك أن وجود تنظيم فريد الذرات تكون نتيجته أن ينتج كل عنصر بصمته الطيفية الخاصة. والشكل يوضح ذرة هيدروجين على اليسار وذرة ليثيوم – ٧ على اليمين

مجموعته المميزة من الخطوط الطيفية. ولقد كان تفسير خطوط طيف الهيدروجين بالمصطلحات الكمية (الذي قدمه نيلز بور في العقد الثاني من القرن العشرين) وراء انتباه الجميع لأهمية النظرية الكمية، ومعرفتهم بأن لدى هذه النظرية ما يفيد في تفسير طبيعة الذرات. وتظل هناك حاجة إلى معرفة بعض الأفكار حول سبب وجود هذه الخطوط على الطيف، ولست في حاجة بالتأكيد لأن تفهم الفيزياء الكمية لكي تكون على يقين تام من أن شكل الشفرة العمودية المميز للخطوط على طيف الضوء الآتي من نجم ما يبوح بالمادة التي يتكون منها النجم.

والآن نأتي إلى إزاحة دوبلر. كما أوضحت من قبل، إذا حدث لضوء قادم من نجم إزاحة نحو الطرف الأزرق من الطيف، فإن ذلك علامة على أنه يتحرك تجاهك، وإذا أزيح الضوء نحو الطرف الأحمر على الطيف، فإن ذلك يشير إلى أن النجم يتحرك مبتعدا عنك. ولكن كيف عرفت ذلك؟ لأن ما تتم ملاحظته فعلاً عبر طيف قوس قزح هو نمط الخطوط الطيفية، وما يُقاس فعلاً عند دراسة ظاهرة دوبلر هو مدى الإزاحة التي حدثت لهذه الخطوط مقارنة بموقعها الأصلية المميزة على الطيف (أطوال موجاتها المحددة) في الشروط المختبرية هنا على الأرض. وفي الواقع لقد تنبأ كريستيان دوبلر بظاهرة دوبلر، بالنسبة لموجات الصوت في الهواء في ١٨٤٢ ، وبعد عام لاحق، وفيما يمكن اعتباره إحدى التجارب العلمية العامة الأكثر إثارة، تم اختبار تنبؤاته باستخدام قطار لسحب عربة سكة حديدية مليئة بعازفي البوق، وكلهم ينفخون اللحن الموسيقي نفسه بكل قوتهم، ويمرون بمجموعة من الموسيقيين لديهم جميعًا مقياس صوتي ملائم يمكنهم من خلاله تسجيل التغيير في طبيعة صوت لحن البوق عندما تقترب منهم عربة السكة الحديدية وتتجاوزهم. واستنتج دوبلر نفسه أن هذه الظاهرة يمكن تطبيقها على الضوء أيضًا، لكنه لم يتقدم تجاه التفاصيل، وكان أول حساب واضح لنظرية ظاهرة دوبلر للضوء على يد عالم الطبيعة الفرنسي أرماند فيزو في ١٨٤٨ - عشر سنوات كاملة قبل استخدام بنسن وكيرشهوف لمنظار الطيف. أي أن فهم ظاهرة دوبلر كان جاهزًا وينتظر أن تصبح تقنية منظار الطيف متطورة بما يكفي لاستخدام هذه التقنية في الحصول على معلومات حول سرعات النجوم ، بما في ذلك معلومات حول السرعة التي تتحرك بها النجوم في المنظومات الثنائية حول بعضها البعض، وهو ما ساعد

حينئذ في إتاحة معلومات حول كتل النجوم. وبدأت عناصر الموضوع تتسق مع بعضها البعض في النصف الثاني من القرن التاسع عشر.

وبسبب ظهور كل تلك التقنيات معًا في نهاية القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرين أصبحت الفيزياء الفلكية علم القرن العشرين عن حق. لكن ظل هناك لغز كبير، والذي ازداد إلغازًا مع نهاية القرن التاسع عشر، والذي يوضح مدى طول الطريق الذي كان على علماء الفلك أن يقطعوه، حتى في بداية القرن العشرين، قبل أن تكون لديهم أي أمل في القول بأنهم قد فهموا طبيعة الشمس والنجوم. لم يكن أحد يعرف كيف تحافظ الشمس والنجوم على اشتعالها كل هذا الزمن المتوقع (وذلك بالنسبة للشمس على الأقل) كما توضح دلائل من الجيولوجيا والتطور التاريخي بالغ الطول بالنسبة للأرض. وكما رأينا، فرغم أن التطورات التقنية مثل التصوير الفوتوغرافي ومنظار الطيف كانت مطلبًا أساسيًا لكي يواصل علماء الفلك تقدمهم، فإنه لا يقل عن ذلك أهمية ما توصل إليه علماء الفيزياء والفلك من فهم نظري راسخ لكيفية تطبيق قوانين الفيزياء على عالم الأجرام الضخمة. وكانت قوانين نيوتن معروفة منذ ما يقرب من عدة قرون، لكن التطورات النظرية المهمة في القرن التاسع عشر تعلقت بالديناميكا الحرارية ودراسة الحرارة وما يحدث للحرارة بشكل خاص والطاقة بشكل عام خلال وجودها في منظومة فيزيائية وانتقالها من منظومة إلى أخرى.

وجاءت بعض الأفكار المهمة، خاصة فيما يتعلق بعمر الشمس، من أحد أبطال العلم الذين لم يتلقوا الحفاوة الواجبة وكان عمله يلقى تجاهلاً شديدًا طوال حياته، لكن تم إدراك أهميته مؤخرًا. إنه جوليوس فون ماير عالم الفيزياء الألماني، الذي حصل عام ١٨٤٠ ، عندما كان قد تأهل حديثًا وعمره ٢٦ عامًا، على وظيفة طبيب بحري على سفينة أقلعت إلى الهند الشرقية. وفي تلك الأيام كانت الحجامة المعروفة مازالت علاجًا طبيًا معترف به، وكان يتم إجراؤها عادة بحماس خاص في المناطق الاستوائية، حيث كان يُعتقد أن استنزاف قليل من الدم من الأشخاص الأصحاء، تمامًا قد يساعدهم في مقاومة الشعور بالوهن بسبب الحرارة الاستوائية. وكان ماير على علم تام بفكرة (كان أنطوان لافوازيه قد قدمها في القرن الثامن عشر) مؤداها أن الحيوانات ذات الدم الحار مثلنا تحتفظ بحرارتها عن طريق احتراق بطيء جدًا داخل الجسم، حيث تتحد

مواد من الطعام الذى نتناوله مع الأكسجين الجوى (تحترق)، وكان يعرف أن الدم الأحمر اللامع الغنى بالأكسجين يتم حمله من الرئتين إلى بقية أجزاء الجسم بواسطة الشرايين، بينما الدم الغامق المائل إلى اللون الأرجوانى، والخالى من الأكسجين، يرجع من جديد إلى الرئتين بواسطة الأوردة.

وكان الجراحون الذين يقوم بعملية استنزاف الدم يهتمون دائمًا بفتح وريد، وليس شريان، لأن الضغط فى الشرايين يكون أكثر ارتفاعًا، ويكون أيقاف النزيف من الشريان أكثر صعوبة من أيقاف نزيف الوريد. ولكن عندما استنزف ماير الدم من بحار فى جاوة، أصابته الدهشة عندما وجد أن الدم الوريدى لديه ذو لون لامع مثله مثل الدم الشريانى العادى - وحدث بالفعل أنه ظن أنه شق شريانًا عن طريق الخطأ. وما أسرع ما اكتشف أن الأمر نفسه موجود فى دم كل الطاقم ودمه هو أيضًا.

وقفز ماير بسرعة إلى النتيجة الصحيحة: أنه كان هناك مزيد من الأكسجين فى الدم الوريدى لسكان المناطق الاستوائية أكثر منه لو كان الأشخاص أنفسهم فى أوروبا لأنهم يحافظون على دفء أجسادهم غالبًا بحرارة الشمس، لذلك لا يحتاجون إلى استخدام مزيد من الأكسجين فى حرق الطعام فى عضلاتهم. واستنتج أن كل أشكال الحرارة الطاقة يمكن تبديل إحداها بالأخرى _المجهود العضلى والدفء فى الجسم، وحرارة الشمس، وحتى الأشكال الأخرى للطاقة مثل حرق الفحم تعتبر أوجهًا مختلفة لظاهرة واحدة، والأكثر أهمية أن كل الحرارة أو الطاقة لا يمكن إيجادها من العدم لكن يمكن تحويلها فقط من شكل إلى آخر.

وعندما عاد ماير إلى ألمانيا فى ١٨٤١ استقر فى مجال الممارسة العامة للطب، ولكنه بشكل جانبى تعلم قليلاً من المعارف فى الفيزياء، وقام بتطوير أفكاره حول الديناميكا الحرارية ونشر أول بحث علمى له مما جذب الاهتمام إلى القابلية للتبادل بين الأشكال المختلفة للطاقة. ولقد نشر أيضًا حوارًا فكريًا حول الشمس كمصدر حرارى وهو ما سنأتى إليه لاحقًا. لكن عمله ووُجِه بتجاهل، وعندما بدأ آخرون فى نشر اكتشافات مماثلة وتلقوا الإطراء الذى يستحقه هو، أصيب ماير باكتئاب حتى أنه حاول الانتحار فى ١٨٥٠، وأمضى عدة سنوات فى مؤسسة علاج نفسى. ومع ذلك لحسن الحظ أن عمله بدأ يلاقى بعض الاعتراف بقيمته، واستعاد صحته وعاش حتى

عام ١٨٧٨ . لكن مثل هذا الحظ لم يوات رائد آخر فى الديناميكا الحرارية لم يلق الحفاوة التى يستحقها، وهو سكوت جون واترستون، المعاصر تقريبًا لماير، وكان مهندسًا مدنيًا يعمل فى شبكة سكك الحديد النامية فى إنجلترا فى ثلاثينيات القرن التاسع عشر، قبل رحيله إلى الهند لتعليم الطلاب العاملين فى شركة الهند الشرقية وواجهته مصاعب كثيرة فتقاعد مبكرًا فى ١٨٥٧ (وعمره ٤٦ عامًا)، وعاد إلى إنجلترا وكرس نفسه للأبحاث. وكان اهتمامه الأساسى الديناميكا الحرارية، التى كان يدرسها فى وقت فراغه منذ سنوات عدة وبعث أبحاثًا ليعرضها للنشر. وكانت أهم فكرة لواترستون والتى تدور حول طريقة انتشار الطاقة بين ذرات وجزيئات غاز، قد أرسلت من الهند إلى الجمعية الملكية فى لندن عام ١٨٤٥، لكن "الخبراء" فى الجمعية لم يتحمسوا للبحث، ولم يكتفوا بعدم نشره بل فُقد منهم - وكان النسخة الوحيدة، حيث إن واترستون أهمل الاحتفاظ بنسخة منه (ويبدو ذلك مجازفة لا تُصدق، حتى فى تلك الأيام التى لم يمكن آلات تصوير المستندات معروفة فيها، مع العلم بأن هذا البحث كان يمثل عمل حياته حتى ذلك الحين حيث اجتاز مسافة تقترب من نصف طول محيط الكرة الأرضية). ومثلما حدث لماير أصيب واترستون بالمرض والاكتئاب عندما لم يجد اعترافًا بعمله. وفى ١٨ يونيو ١٨٨٣ خرج من بيته ولم يره أحد بعدها أبدًا. ومع ذلك فإن البحث "المفقود" لوارتستون عُثر عليه فى ١٨٩١ فى أقبية الجمعية الملكية وقدر أهميته فورًا جيل جديد من علماء الفيزياء، ونُشر البحث فى ١٨٩٢ - حيث جاء متأخرًا تمامًا ولا يفيد مؤلفه.

ويعتبر واترستون فى صميم موضوعنا، لأنه توصل إلى الفكرة نفسها التى وصل إليها ماير حول طريقة توليد الحرارة من الشمس. وأدرك العالمان (بشكل متقدم عن زمنهما وكان علماء كثيرون مترددين فى قبول هذه الفكرة فى البداية) أنه من المحتم أن تاريخ الأرض يعود إلى زمن قديم جدًا، بكل المقاييس البشرية، حتى يكون فى استطاعة قوى الطبيعة أن تنجز كل العمل المتعلق بإقامة الجبال وكسوتها ... إلخ. وبعد نشر داروين لنظريته حول التطور والانتخاب الطبيعى فى ١٨٥٩، أصبحت مشكلة عمر الأرض فى بؤرة الاهتمام أكثر بكثير مما كان عليه الأمر من قبل، حيث إن الانتخاب الطبيعى يتطلب أيضًا فترة زمنية هائلة لكى يتم إنجاز كل هذا التنوع فى أشكال

الحياة على الأرض انطلاقًا من سلف مشترك على درجة ما من البساطة. وفي النصف الثاني من القرن التاسع عشر، اندلع جدل بين علماء الجيولوجيا وعلماء التطور من جانب، الذين قالوا بأن عمر الأرض (والشمس بالتالي) يجب أن يعود إلى مئات أو حتى آلاف الملايين من السنوات، وعلماء الفيزياء من جانب آخر، وكان رأيهم أنه لا توجد آلية فيزيائية معروفة يمكنها المحافظة على الشمس مضيئة كل هذا الزمن.

وجاء الدعم الأساسي لرأي علماء الفيزياء، بشكل مستقل من هرمان فون هيلمهولتز من ألمانيا ووليام تومسون (الذي أصبح فيما بعد لورد كلفن، والذي يُشار إليه عادة بهذا الاسم) في إنجلترا. لكن ماير وواترستون كانا قد سبقاهما وتأكد كل منهما من عدم وجود طاقة كيميائية (مثل احتراق الفحم) يمكنها المحافظة على الشمس ساخنة أكثر من عدة آلاف من السنوات، واقترح كل منهما على حدة مصدر الطاقة الوحيد البديل الذي كان معروفًا في القرن التاسع عشر، ألا وهو الجاذبية. ومع ذلك يستحق كلفن النصيب الأكبر من الاعتراف بالفضل؛ لأنه قام في النهاية بتطوير الفكرة إلى أفضل شكل متكامل. فالجاذبية مصدر محتمل للطاقة الشمسية لأن كل شيء يسقط تجاه جسم ما مثل الشمس تحت تأثير الجاذبية يتحرك أسرع فأسرع حتى يسقط على السطح. لذلك فإن طاقة حركتها (الطاقة الحركية) تتحول إلى طاقة حرارية بالتصادم (وهذا التحول نفسه الذي يحدث للطاقة الحركية إلى طاقة حرارية يفسر ما يحدث عندما تسخن حرارة كوابح السيارة باستخدامها لإيقاف السيارة أو إبطاء حركتها، ويتضح ذلك بجلاء في توهج اسطوانات الكبح في سيارات الجائزة الكبرى لسباقات فورمولا واحد). ورأى كل من ماير وواترستون أنه لا بد أن الشمس ظلت ساخنة لعدة ملايين من السنوات إذا أمكن "تزويدها بوقود" عن طريق إمداد مستمر من الكويكبات (كتل من الصخور الكونية تصل أطوالها إلى عدة كيلومترات) التي تتساقط عليها قادمة من الفضاء.

ولا تصل كمية المادة التي يجب أن تسقط على الشمس كل عام للقيام بهذه المهمة إلى هذه الحدود في الواقع، فقد يكفي فقط واحد في المائة من كتلة الأرض كل عام. وحتى لو تركنا جانبا السؤال حول المكان الذي يمكن أن تأتي منه كل هذه المادة، فإنك إذا جمعتها كلها خلال ملايين (أو حتى آلاف) السنوات لما كان لها تأثير يذكر على

الشمس؛ حيث إن كتلة الشمس التي تزداد بهذا المعدل الثابت، ستُرفع من قوة جاذبيتها على الكواكب، وتتشبث قبضتها بالأرض مما يقلص من طول العام عليها. وحيث إننا نعلم من خلال السجلات القديمة لحوادث كسوف الشمس أن مدار الأرض وطول العام ظلا ثابتين عبر آلاف السنوات، فإنه يمكن التخلي عن تلك الفرضية حول هذا النوع البسيط من التسخين بالجاذبية. وكان هناك تحسين لهذه الفكرة يمكنه أن يعطي للشمس عمرًا محتملاً يمتد إلى عشرات الملايين من السنوات، وكان هذا أقصى ما استطاع سيناريو التسخين بالجاذبية أن يصل إليه من تحسين على يد هيلمهولتز وكلفن في نهاية الأمر.

ومن وجهة نظر الديناميكا الحرارية يمكن تعريف الحرارة على أنها حركة الذرات والجزيئات التي تتكون منها المادة. فإذا كانت هذه الذرات أسرع حركة، يصبح الجسم أكثر سخونة. ولكل جزيء طاقته الحركية الخاصة، وعلى المقياس بالغ الصغر فإن هذه الطاقة ترتبط بالجاذبية كما يرتبط بها كتلة من الصخر. ومع سقوط الجزيء في اتجاه مركز جسم ضخم فإنه يكتسب طاقة حركية من مجال الجاذبية، مما يجعله يتحرك بسرعة أعلى. وهذا صحيح حتى لو كانت الذرات أو الجزيئات جزءًا من جسم ضخم؛ لذلك لو تقلصت الشمس كلها قليلاً سوف تتحرك الجزيئات التي تتكون منها الشمس بسرعة أعلى بعض الشيء، مما يولد الحرارة. وللمحافظة على الشمس مضيئة بالمعدل الذي نراه حاليًا، وهي تشع حرارة بشكل مستمر في الفضاء، يجب أن تتقلص بمقدار ٥٠ مترا فقط كل قرن، وهو مقدار بالغ الصغر لم يكن من الممكن أن يلاحظه علماء الفلك في القرن التاسع عشر. ولن تكون هناك مشكلة بالنسبة لمدارات الكواكب، لأن الكتلة الكلية للشمس، وبالتالي قوة جاذبيتها، ستظل كما هي.

وليس هناك ما يمكن اعتباره خطأ من الناحية الفيزيائية، لكن ظلت هناك مشكلة كبيرة فيما يتعلق بعدد من الأفكار، لأن هذا التصور يتضمن أن الشمس لا بد أن تتقلص كلها خلال نحو ٢٠ مليون سنة، وفي الوقت الذي قدم كلفن هذا الرأي في شكله النهائي، في ١٨٨٧، كان علماء الجيولوجيا وعلماء التطور يقولون بأنه حتى هذه الفترة الزمنية الهائلة تعتبر بعيدة إلى حد ما عن احتياجات النتائج التي توصلوا إليها. وكانت الطريقة الوحيدة التي يمكن للشمس من خلالها توليد الحرارة خلال فترة طويلة كافية

لتفسير الأدلة المستقاة من السجل الجيولوجي، وتطور الحياة على الأرض، أن يتم استخدام مصدر طاقة مجهول بالنسبة للعلم في القرن التاسع عشر. ومصدر الطاقة هذا، والذي نعرفه حاليًا، موجود في نوى الذرات - لكن طبيعة النواة الذرية لم تكن قد عُرفت حتى العقد الأول من القرن العشرين. وكان طريق التقدم قد أصبح ممهداً، تماماً في نهاية القرن التاسع عشر، عن طريق عالم الجيولوجيا الأمريكي توماس تشمبرلين، الذي كتب في صحيفة "العلم" في ١٨٩٩:

هل المعلومات المتوافرة حاليًا حول سلوك المادة تحت تأثير الشروط الاستثنائية مثل تلك الموجودة في باطن الشمس، كاملة بما يكفي لضمان التأكيد بعدم وجود مصادر مجهولة للحرارة كامنة هناك؟ ومازال التكوين الداخلي للذرات محل التساؤلات. وليس من المستبعد أن تكون تنظيمات معقدة تحتوي على طاقات هائلة. ولا يمكن لعالم كيمياء جاد أن يؤكد بالطبع أن الذرات هي في الحقيقة جسيمات أولية أو أنها لا تحتجز داخلها طاقات ضخمة جداً. ولا يوجد عالم كيمياء حريص يمكنه أن يؤكد أو ينكر أن الأحوال الاستثنائية الموجودة في مركز الشمس لا يمكنها أن تصدر كمية من هذه الطاقة.

كان شامبرلين، كما سنرى، محقًا. لكن قبل إثبات ما وصل إليه، كان على علماء الفيزياء أن يتوصلوا إلى فهم مواطن هذه الطاقات الهائلة، وكان لا يزال على علماء الفلك إنجاز جزء من عمل مهم لتصنيف النجوم واكتشاف علاقات القرابة بينها.

الفصل الرابع

داخل النجوم

يُروى التاريخ العلمي غالبًا، مثله مثل التاريخ العادي، بالاستناد إلى الشخصيات المشهورة. لذلك نعرف من أنجزوا الاكتشافات المهمة والاختراعات ومتى تم ذلك، ونعرف، رغم ندرة الإشارة إلى هذا الأمر، أن مسار التاريخ العلمي كان من المحتمل أن يكون مختلفًا جداً إذا لم تكن شخصيات مثل إسحاق نيوتن أو تشارلز داروين أو ماري كوري موجودين. لكن هذا الانطباع قد يكون خاطئًا. وكما حاولت توضيح أن التقدم العلمي مرتبط تماماً بتقدم التقنية، يضاف إلى ذلك أن التطورات العلمية تقوم على ما تم إنجازه سابقًا. وليس من المعقول، مثلاً، القول بأن إسحاق نيوتن كان في استطاعته التوصل إلى نظرية النسبية لألبرت أينشتاين، لأنه لم يكن لديه معرفة بطبيعة الضوء التي بنى عليها أينشتاين نظريته، ولا التقنيات الرياضية التي كانت قد تطورت في القرن التاسع عشر وأتاحت الوسائل التي كان أينشتاين في حاجة إليها للتوضيح الذي قدمه للعلاقة التبادلية بين المكان والزمان.

وتكون التطورات العلمية في الغالب منتجات لزمنها، وإذا لم يصل أحد العلماء إلى اكتشاف ما، فمن المؤكد غالبًا أن يصل إليه عالم آخر في الوقت نفسه تقريبًا. والمثال التقليدي لهذا الأمر نظرية التطور بالانتخاب الطبيعي. ويُنظر إلى الإنجاز الضخم لتشارلز داروين على نطاق واسع على أنه أهم الأفكار العلمية في كل العصور. لكن ذلك تم اكتشافه بالصياغة نفسها بالضبط، مبني على أسس البحث المبكر نفسها تماماً، بواسطة عالم طبيعة آخر هو ألفريد راسل والاس، فور الاكتشاف العظيم الذي قدمه داروين. وكان داروين قد احتفظ بأفكاره في السر، ولأنه كان يخشى على الأقل

من آثارها على زوجته، وهي مسيحية تقليدية ورعة، فقد نشرها بمجرد أن تلقى من والاس خلاصة أبحاثه، التي كانت نظرية مماثلة تمامًا لنظرية داروين، طالبًا منه رأيه فيها. فلو كان داروين لم يوجد قط، لكانت نظريته الآن هي نظرية والاس للتطور والانتخاب الطبيعي التي يدور الجدل حولها الآن على أنها أهم فكرة علمية في كل العصور.

ولا يمكن - إلا فيما ندر - الإشارة إلى تطوير رئيسي في العلم على أنه اعتمد على وجود عبقرية فريدة. والاستثناء الوحيد الذي يمكن ذكره هو إسحاق نيوتن نفسه، الذي أسس بالفعل المنهج العلمي كله في نهاية القرن السابع عشر. وبدون نيوتن، كان من المحتمل تمامًا أن يتأخر كل التطور في العلوم الفيزيائية لجيل تالي. ولكن وجهة نظري حول الطريقة المنطقية التي يتطور بها العلم من الأفكار العلمية السابقة، وإن كان بمساعدة التقنيات الحديثة (التي نتجت هي نفسها عن فهم أفضل لطبيعة العالم)، تتضح تمامًا وبشكل خاص من الطريقة التي اكتشف، أو اخترع، بها علماء الفلك أهم رسم بياني في الفيزياء الفلكية بأكملها، وهو وسيلة يعتمد عليها كل فهمنا لما يجري داخل النجوم.

ويُطلق على هذا الرسم البياني شكل هرتز سبرنج رسل [٣٥] (أو شكل HR) ، حيث اكتشفه في الوقت نفسه بشكل مستقل عن بعضهما عالما فلك: دان إجنار هرتز سبرنج والأمريكي هنري نوريس رسل. ويماثل الدور الذي يلعبه هذا الشكل الذي يعتبر حجر أساس للفيزياء الفلكية دور الجدول الدوري للعناصر (الذي تم اكتشافه، بالمناسبة، عن طريق عدة علماء بشكل مستقل عن بعضهم البعض) كحجر أساس الكيمياء. ويعتمد الجدول الدوري على ملاحظات حول خواص العناصر الكيميائية، ويدلنا على العلاقة بين العناصر المختلفة، بينما يدلنا علماء النظريات على سبب هذه العلاقة - حيث إن النظرية الجيدة، أو النموذج، حول البنية الذرية لا بد أن تفسر الجدول الدوري. وبالمثل فإن شكل هرتز سبرنج رسل يدلنا على العلاقة بين الأنواع

(٣٥) شكل هرتز سبرنج رسل Hertzspring - Russel diagram: هو شكل أدرجت فيه النجوم حسب نوعها الطيفي وقوة إشعاعها ممثلاً في لمعانها الحقيقي _المترجم.

المختلفة من النجوم، ويدلنا علماء النظريات على سبب هذا الاختلاف. ويجب على النظرية الجيدة، أو النموذج، حول بنية النجوم أن تتسق مع هذا الشكل. وليس من المدهش أن يتوصل عالمان بشكل مستقل إلى فكرة نفسها هذا الشكل مبكرًا في القرن العشرين، حيث إنه لم يحدث سوى في نهاية القرن التاسع عشر، كما سبق أن رأينا، أن أصبحت الملاحظات حول أشياء مثل الألوان واللمعان الحقيقي للنجوم دقيقة بما يكفي بالنسبة لعلماء الفلك حتى يستطيعوا تصنيف النجوم بهذه الطريقة.

وتدخل ألوان النجوم في الموضوع الذي نبحثه هنا لأنها ترتبط بدرجة الحرارة. وفي أبسط أشكالها، تعتبر هذه العلاقة مألوفة في خبرة الحياة اليومية. هل لفتت نظرك أقراص كبح حركة السيارة التي تتوهج باللون الأحمر عندما تسخن؟ ولو أصبحت هذه الأقراص نفسها أكثر سخونة، فإنها ستتوهج باللون الأزرق - الأبيض. ولو كانت باردة بعض الشيء فإنها ستشع أشعة تحت حمراء، لا تُرى بالعين، وتبدو سوداء بالنسبة إلينا. وبالطريقة نفسها، فإن النجم الأحمر يكون أكثر برودة على سطحه، من حيث يأتي إلينا الضوء، مقارنة بنجم أبيض، ويقع النجم البرتقالي _الأصفر مثل الشمس على نقطة بين هذين الحدين. لكن علماء الفلك يمكنهم التوصل إلى ما هو أفضل من ذلك، بالقياس الدقيق لكمية الطاقة الآتية من نجم عند مجموعة من أطوال الموجات المختلفة (ويتم عادة اختيار دقيق لثلاثة أطوال موجات، رغم إمكانيات التوصل إلى نتائج، أقل دقة، بواسطة طولا موجتين)، ويمكنهم بدرجة دقة عالية جدًا معرفة مدى سخونة الكوكب. ودرجة الحرارة السطحية هي التي يتم مقارنتها باللمعان الحقيقي للنجم (والذي يعتمد على معرفة مسافته) في شكل هرتز سبرنج رسل. ونظرًا لوجود اللون في هذه العلاقات، ووجود مقدار يمثل اللمعان من جانب آخر، فإنه يُطلق على هذا الشكل أحيانًا شكل "اللون _درجة اللمعان" [٣٦].

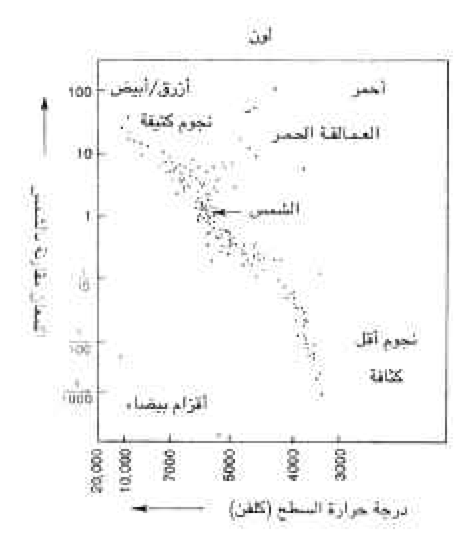
وكان هرتز سبرنج هو أول من حاول وضع علاقة بين الألوان ودرجات لمعان النجوم بطريقة منهجية، ونشر بحثين حول هذا الموضوع في ١٩٠٥ و ١٩٠٧ وتوصل

(٣٦) درجة اللمعان Magnitude: درجة لمعان الأجرام السماوية مصنفة تبعًا لقياس رقمي، وتدعى أيضًا الجرم الظاهري - المترجم.

إلى أن النجوم الزرقاء والنجوم البيضاء تكون لامعة بشكل حقيقي، لكن بعض النجوم البرتقالية والحمراء تكون لامعة بينما تكون الأخرى خافتة. ونشر في ١٩١١ الأشكال الأولى التي تربط بين ألوان النجوم ودرجة لمعانها، وهي النماذج الأولى لما نطلق عليه الآن أشكال هرتز سبرنج رسل. لكن كل هذه الأعمال نُشرت في صحف غير مشهورة وغير واسعة الانتشار ـ ولا ينطبق هذا بالطبع على علماء الفلك في الولايات المتحدة ـ لذلك عندما لاحظ رسل، عالم الفلك الأكثر شهرة في جامعة برنستون، العلاقة نفسها ونشر أشكالاً مماثلة في ١٩١٣، فإنه فعل ذلك دون علم بأي شيء يتعلق بأعمال هرتز سبرنج.

ويمكنك التعرف فوراً على أهمية أشكال هرتز سبرنج رسل بالنظر قليلاً وبشكل أكثر اقتراباً من أحد الاكتشافات الأولى التي توصل إليها هرتز سبرنج: حقيقة أن النجوم البرتقالية والحمراء تكون على نوعين مختلفين. وإذا كان اللون يعتمد على درجة حرارة سطح النجم، فكيف يكون لنجمين لهما اللون نفسه درجتي لمعان مختلفتين؟ قد يعود ذلك فقط إلى أن بعض النجوم كبيرة والأخرى صغيرة. وتحدد درجة حرارة النجم كمية الحرارة التي تنبعث من كل متر مربع من سطح النجم. فإذا كان لنجم ما مساحة سطح أوسع مائة مرة من نجم آخر، فإن درجة لمعانه تكون أعلى بمقدار مائة ضعف، حتى لو كان للنجمين درجة الحرارة السطحية نفسها، وبالتالي اللون نفسه. ويمكنك حتى النظر إلى العملية العكسية، إذا عرفت اللمعان الحقيقي واللون (درجة الحرارة) لنجم ما، يمكنك معرفة حجمه.

من جانب آخر فإن أهم صفة لشكل هرتز سبرنج رسل، أن أغلب النجوم تتبع القاعدة البسيطة القائلة بأن النجوم الأكثر لمعاناً تكون في الواقع أعلى حرارة مقارنة بالنجوم الأكثر خفوتاً. ومع ذلك، ولأسباب تاريخية، يُقاس لمعان النجوم على المحور الرأسي في الشكل البياني بالطريقة العادية، وتتعين درجة الحرارة متراجعة على الشكل، بحيث تزداد من اليمين إلى اليسار على المحور الأفقي، وهذا يعني أن النجوم الأكثر سخونة تكون على اليسار والنجوم الأكثر برودة على اليمين. وفي هذا النوع من



شكل (٤ – ١) شكل هرتز سبرنج رسل لنجوم مجاورة للشمس. والاصطلاحات المعقدة في الشكل موضحة في النص

تعيين النقاط (والشكل ٤ – ١ للنجوم المجاورة للشمس، على بعد ٧٠ سنة ضوئية منا)، تقع أغلب النجوم على شريط يمتد من الأعلى يساراً (ساخنة ولامعة) إلى الجهة السفلية يميناً (باردة ومعتمة).

ويطلق على هذا الشريط التتابع الرئيسي، وتعتبر الشمس نجماً في التتابع الرئيسي. وهناك بعض الاستثناءات في هذه القاعدة تخص النجوم اللامعة الباردة معاً، مما يعني أنها كبيرة – أكثر ضخامة من الشمس ـ وتقع أعلى شكل هرتز سبرنج رسل، أعلى التتابع الرئيسي. ويطلق على النجم الأكبر من الشمس مائة مرة العملاق.

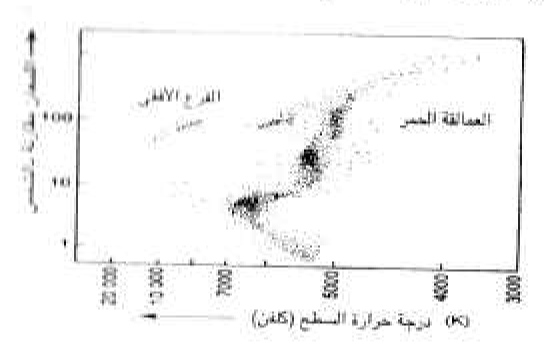
والأكبر منها ألف مرة يطلق عليه نجم فوق عملاق، والنجم الأكبر في حجمه من الشمس عشر مرات فقط يسمى تحت العملاق (وتشير هذه الأبعاد إلى أحجام النجوم، وليس إلى كتلها). ومن لونها الأحمر وحجمها، يطلق على النجوم الكبيرة العمالقة الحمراء (أو فوق العملاقة الحمراء).

وهناك في الجانب السفلي من الشكل، أسفل يساراً، توجد نجوم صغيرة وساخنة معاً. يتدفق من كل متر على سطحها كمية ضخمة من الحرارة، لكن مساحة سطحها صغيرة جداً (مقارنة بالشمس)، لذلك فرغم أنها ساخنة بيضاء تكون خافتة. ويطلق على هذه النجوم الأقزام البيضاء. وهناك نجوم تقع أسفل التتابع الرئيسي تماماً، ويطلق عليها تحت الأقزام. لكن ٩٠ في المائة من النجوم موجودة في التتابع الرئيسي.

وأهم ما نخرج به من كل ذلك أننا لم نبدأ معرفة البنية الداخلية للنجوم، وطريقة توليدها للحرارة، إلا في عشرينيات القرن العشرين، عندما جمع رائد علم الفلك آرثر إدنجتون، الذي يعمل في جامعة كمبردج، كل القياسات المتوافرة معاً لكتل النجوم وتوصل إلى وجود علاقة بسيطة بين كتلة أن نجم في التتالي الرئيسي وقوة إشعاعه. والنجوم الأكثر لمعاناً (الموجودة في موقع على التتالي الرئيسي أعلى يساراً) هي أيضاً الأكثر ضخامة. وتوصل إدنجتون أيضاً إلى وجود نجوم صغيرة تبلغ كتلتها خمس كتلة الشمس، ونجوم لها كتل تصل إلى ٢٥ ضعف كتلة الشمس . والنجم الموجود في التتالي الرئيسي وله كتلة ضعف كتلة الشمس بمقدار ٢٥ مرة يكون أيضاً أكثر لمعاناً ٤٠٠٠ مرة من لمعان الشمس.

وهذا أمر منطقي إلى حد ما، وكانت فائدته كبيرة حيث ساعد علماء الفلك الذين كانوا يحاولون معرفة ما يدور داخل النجوم. وعلى النجوم الأكثر ضخامة أن تحرق وقودها (أياً كان) بنشاط أعلى لكي تحافظ على نفسها في مواجهة وزنها - فعليها أن تولد مزيداً من الضغط في داخلها، مما يعني أن عليها أن تطلق طاقة بشكل أكثر سرعة، وأن تحرق وقودها بمزيد من السرعة مقارنة بما تفعله النجوم الأخف، ولا يدوم بقاؤها على التتابع الرئيسي لمدة طويلة كما هو شأن النجوم الأصغر (الأقل ضخامة) - وهو سيناريو جيمس دين، حيث النجوم الأكثر بريقاً تعيش حياة سريعة وتموت شابة .

ويمكننا أن نرى بالضبط هذه العملية وهي تحدث عندما ننظر إلى أشكال هرتز سبرنج رسل من جانب حشود النجوم الكروية. وهي مجموعات نجوم كانت قد ولدت معاً من سحابة مفردة من غاز وغبار الانهيار، لذلك فإن لها جميعاً العمر نفسه. وعندما يبحث علماء الفلك في شكل هرتز سبرنج رسل عن مثل هذا الحشد فإنهم لا يجدون نجوماً في الطرف الأكثر لمعاناً للتتالي الرئيسي، وبدلاً عن ذلك يجدون ذيلاً من النجوم الأكثر برودة يمتد إلى الشمال في الشكل البياني. ويُعرف ذلك بالفرع الأفقي. وبمجرد معرفتنا بالوقت الذي احتاجته النجوم ذات الكتل المختلفة لكي تستهلك وقودها وابتعد عن التتالي الرئيسي، يمكننا معرفة عمر الحشد الدائري بمجرد قياس مكان نهاية التتالي الرئيسي وتحوله نحو منطقة العملاق الأحمر - لكن هذا التصور كان لا يزال بعيداً عن الذهن في ١٩٢٤، عندما نشر إدنجتون الشكل البياني الرابط بين الكتلة وكمية الإشعاع الذي توصل إليه. وفي بداية عشرينيات القرن العشرين كان علماء الفلك قد بدأوا فقط في تخمين كيفية إنتاج الشمس والنجوم للطاقة داخلها، وكانوا لا يزالون تقريباً على جهل تام بالمادة التي تتكون منها الشمس والنجوم بالفعل.



(شكل ٤ - ٢) شكل هرتز سبرنج رسل لحشد كروي نموذجي للنجوم. ولأن نجوم التتالي الرئيسي الأكثر ضخامة والأكثر سخونة في الجزء العلوي الأيسر من الشكل تعيش حياة أسرع وتموت شابة، تدل النقطة التي ينحرف بها التتالي الرئيسي إلى اليمين على عمر الحشد

وكانت "منابع الطاقة بالغة الضخامة"، الموجودة في عمق الذرة، والتي أشار إليها توماس شامبرلين في ١٨٩٩، قد تم بحثها في تسعينيات القرن التاسع عشر، رغم أنه لم يكن أحد في ذلك الوقت يعرف تمامًا ما كانوا يقومون باستكشافه. واندفعت الاكتشافات في العقود التالية، مع دعم التقنيات للتجارب، ودعم التجارب للنظريات، وتشجيع النظريات لتطوير تجارب جديدة بتقنيات أكثر دقة. ولا تبدو أهم التقنيات التي شاركت في هذه الاكتشافات المهمة دقيقة في وقتنا الراهن، فقد كانت مجرد أنبوب زجاجي مفرغ، بقليل من الغاز داخله أو بدون غاز، حيث كان يتم إحداث تفريغ كهربائي فيه، من لوح معدني عند أحد طرفي الأنبوب (يطلق عليه كاثود) [٣٧] إلى لوح معدني آخر (يُطلق عليه أنود) [٣٨] في الطرف الآخر من الأنبوب. ويشبه ذلك أنبوب ضوء غاز النيون، أو أنبوب الصورة في جهاز التليفزيون. لكن التجارب التي كان يتم خلالها تمرير شحنة كهربائية خلال هذه الأنابيب المفرغة، كانت تتطلب مضخات من القوة بحيث يمكنها سحب كل الهواء تقريبًا إلى خارج الأنبوب، ولم يتم إنجاز أنبوب التفريغ هذا إلا في سبعينيات القرن التاسع عشر بواسطة وليام كروكيس.

وفي تسعينيات القرن التاسع عشر، كان ولهيلم رونتجين أحد علماء الفيزياء الكثيرين الذين درسوا طبيعة الإشعاع الذي يمر من خلال أنبوب مفرغ من الكاثود إلى الأنود (وكان يطلق على هذا الإشعاع حينئذ أشعة الكاثود). وفي ١٨٩٥ كان يبحث الطريقة التي تنتج بها هذه الأشعة وميض الضوء على شاشة مستشعة (فلورسنت) عندما لاحظ على شاشة فلورسنت أخرى، موجودة بالقرب من الجهاز الذي يجرى به التجارب لكنها بعيدة عن مسار إطلاق أشعة الكاثود، أنها تتألق بالوميض. واتضح أن سبب ذلك وجود نوع آخر من الأشعة لم يكن معروفًا من قبل يأتي من منطقة على الجانب الزجاجي للأنبوب المفرغ كان قد تلقى طلقات من أشعة الكاثود – نوع ثانوي من الإشعاع ناتج عن تأثير أشعة الكاثود نفسها – لقد اكتشف الأشعة السينية، وما أسرع ما اتضح أنها نوع من الإشعاع الكهرومغناطيسي، مثلها مثل الضوء تمامًا

(٣٧) الكاثود cathode : القطب السالب من بطارية (المترجم).

(٣٨) الأنود anode : هو القطب الموجب من بطارية (المترجم).

لكنها ذات أطوال موجية أقصر. وبعد عامين فقط، في ١٨٩٧، توصل ج. ج. تومسون إلى أن أشعة الكاثود هي جسيمات بالغة الصغر في الواقع، يحمل كل منها كمية صغيرة من الشحنة الكهربائية السالبة، يبدو أنها تشظت خارجة من الذرات (ولم يثبت ذلك بالفعل إلا في ١٨٩٩، لكن أغلب علماء الفيزياء احتفلوا بمرور مائة عام على اكتشاف الإلكترون في ١٩٩٧). وكان الاكتشافان –الأشعة السينية والإلكترونات– قد توصل إليهما تقريبًا عالم الفيزياء الألماني فيليب لينارد، حيث سارع العالمان إلى تسجيل الاكتشافين فعل ذلك رونتجين أولاً ثم تومسون وهما يتنافسان على لقب صاحب اكتشاف بالغ الأهمية. ولم يكن ممكنًا أن تتوصل الأجيال السابقة من العلماء إلى أي من هذين الاكتشافين المهمين، لا لشيء، إلا لأن هذه الأجيال لم يكن لديها مضخات هواء جيدة قادرة على التفريغ المناسب للأنابيب.

وحفّز اكتشاف رونتجين جولة جديدة في المجال التجريبي. جاءت أشعته السينية من منطقة لامعة على زجاج الأنبوب المفرغ، حيث جعلت أشعة الكاثود (الإلكترونات) الزجاج يشع. وهناك مواد أخرى عديدة تتوهج بطريقة تبدو مماثلة، حيث تشع تحت تأثير ضوء الشمس. وكان لاكتشاف رونتجين أثر كبير على هنري بيكريل في باريس، حيث دفعه إلى بحث كل المواد المتشعشعة التي وجدها في متناوله، باحثًا عن أي شيء يشبه الأشعة السينية قد يصدر عنها. ودرس بيكريل بلورات تتوهج بعد تعريضها لضوء الشمس، واكتشف أن الإشعاع الصادر عنها يمكنه أن يحدث تغبيشًا على لوح تصوير فوتوغرافي حتى لو تم تغليف هذا اللوح بصفحتين من الورق الأسود السميك. وظن في البداية أنه اكتشف شيئًا يشبه الأشعة السينية، بل وربما أن البلورات تبث أشعة سينية. وفي فبراير ١٨٩٦، وكانت باريس تعاني من الإظلام منذ عدة أيام، بينما هناك تجربة جديدة تنتظر في خزانة ذات رفوف لتعريضها لضوء الشمس. وفي هذه المرة كان طبق من البلورات موجود على لوح فوتوغرافي مضاعف التغليف، مع قطعة معدنية على هيئة صليب بين الطبق واللوح. وبعد أن فرغ صبر بيكريل من انتظار شروق الشمس، وفي حركة بدت لحظتها صادرة من مجرد نزوة أزاح طبق التصوير الفوتوغرافي بعيدًا، ولدهشته وجد صورة واضحة للخطوط الخارجية للصليب المعدني على اللوح. لقد أنتجت البلورات التي استخدمها في تجربته إشعاعًا مر من خلال

الورق الأسود الذى يحمى اللوح (لكنه لم يمر من خلال الصليب المعدنى) وأحدث تغبيشًا عليه، رغم أن البللورات لم تتعرض لضوء الشمس ولم تكن متشعشعة. لقد اكتشف بيكيريل نشاطًا إشعاعيًا، وما أسرع ما اتضح أن مصدر هذا النوع من الإشعاع هو اليورانيوم، أحد العناصر الكيميائية الموجود فى البللورات التى كان يجرى عليها تجاربه.

كان اكتشاف النشاط الإشعاعى لغزًا ضخمًا، حيث بدا الأمر كما لو أنه من الممكن الحصول على شىء من لاشىء. فلكى تحصل على أشعة سينية عليك أن تعطى طاقة، على هيئة كهرباء، فى أنبوب مفرغ للحصول على أشعة الكاثود، وتحدث طاقة هذه الأشعة بعض التأثيرات (التى لم تكن مفهومة فى ذلك الوقت) على زجاج الأنبوب، مما يجعله يتوهج وتصدر عنه أشعة سينية. وفى حالة التشعع من الواضح أن توهج المادة التى تعرضت لضوء الشمس يأتى من الطاقة التى امتصتها المادة من الشمس - إنها، بتعبير مختلف، قد خزنت ضوء الشمس. فمن أين جاءت الطاقة المنبعثة فى النشاط الإشعاعى؟

كان اللغز قائمًا بكل ثقله فى ١٩٠٢ . وفى ذلك الوقت كانت مارى وبيير كورى، وهما يعملان معًا فى باريس، قد انطلقا من حيث توقف بيكيريل، وتوصلا إلى أن النشاط الإشعاعى (وصكت مارى المصطلح "المادة النشيطة إشعاعيًا" فى ١٨٩٨) لا يحدث فى اليورانيوم فقط، وتعرفا على عنصرين لم يكونا معروفين من قبل - البولونيوم والراديوم - وهما من العناصر شديدة الإشعاع. وفى ١٩٠٣، وهو العام الذى فاز فيه مارى وبيير كورى وبيكيريل بجائزة نوبل فى العلوم الفزيائية عن اكتشافاتهم فى مجال النشاط الإشعاعى، قاس بيير كورى ومساعده ألبرت لابورد كمية الحرارة الناتجة عن الراديوم، بشكل تلقائى، بدون مصدر للطاقة يمكن رصده من البيئة المحيطة. ويؤدى النشاط الإشعاعى الموجود داخل الراديوم إلى تدفئة قطعة منه يمكن الشعور بحرارتها باللمس. وتوصل كورى ولابورد إلى أن كل جرام من الراديوم النقى ينبعث منه طاقة كل ساعة كافية لتسخين ١,٣ جرام من الماء من درجة حرارة الصفر المئوى إلى درجة الغليان. ويعطى الراديوم حرارة كافية لإذابة جليد يماثله فى الوزن فى ساعة!

وأدى ذلك إلى حدوث هلع، حتى أن بعض علماء الفيزياء قالوا بأن هذا الاكتشاف يحطم قانون حفظ الطاقة، وهو من القوانين الحائزة على أعلى تقدير علمى، حيث إن الطاقة كما هو واضح يمكن الحصول عليها بدون أى مصدر.

وفى ١٩٠٤، رفض لورد كلفن، وكان فى الثمانين من عمره، هذا الاحتمال، وقدم له بديلاً يقول بأن الطاقة قد جاءت إلى الراديوم بالقطع بواسطة بعض الموجات الغامضة غير المرئية من خارجه - "أغامر بالقول بوجود موجات ما غير ملموسة هى التى تمد الراديوم بهذه الطاقة". لكنه كان على خطأ، وكان هناك باحث محدد هو الذى كان قادراً على حل هذا اللغز الذى وضعته أعمال كورى ولابورد، وبدأ سبر "منابع طاقات بالغة الضخامة" داخل الذرة.

وُلد إرنست رذرفورد فى نيوزيلاندا، لكنه كان طالب أبحاث فى كمبريدج وقت اكتشاف بيكيريل للنشاط الإشعاعى، وكان يعمل فى مختبر كافندش تحت إشراف ج.ج. تومسون (وعمل بعد ذلك فى كندا وفى جامعة مانشستر قبل خلافته لتومسون، فى ١٩١٩، فى رأسة كافندش).

وتحول إلى الاهتمام بالنشاط الإشعاعى فى ١٨٩٧، وسرعان ما توصل إلى أن الإشعاع الذى اكتشفه بيكيريل تكون فى الواقع من نوعين من "الأشعة"، أطلق عليهما إشعاع ألفا وإشعاع بيتا، من أول حرفين فى الأبجدية الإغريقية. وتوصل فى ١٩٠٠ إلى نوع ثالث من الإشعاع، أطلق عليه إشعاع جاما. وأوضحت دراسات لاحقة أن أشعة بيتا هى فى الواقع إلكترونات سريعة الحركة - مماثلة لأشعة الكاثود، لكنها تحمل طاقة أكثر بكثير. بينما أشعة جاما نوع من الإشعاع الكهرومغناطيسى الكثيف، يشبه الأشعة السينية بل إن له طاقة أعلى. وركّز رذرفورد على أشعة ألفا (خلال فترة زمنية طويلة وكان ينجز خلالها أعمال أخرى)، وابتكر سلسلة من التجارب أوضحت فى البداية أن أشعة ألفا هى أيضًا سيال من الجسيمات، وأوضح فى ١٩٠٨، أن جسيم ألفا المفرد (كما أصبح يطلق عليه) له كتلة أربع ذرات هيدروجين نفسها (بالدقة نفسها التى يمكن أن تتوصل إليها التجارب المعاصرة)، لكنه يحمل وحدتى شحنة كهربائية موجبة. كان مطابقًا لذرة هليوم فقدت إلكترونين

وجاء التصور الحديث للذرة على أنها بالغة الصغر لها نواة مركزية موجبة الشحنة يحيط بها سحابة من الإلكترونات سالبة الشحنة، من تجارب رذرفورد أيضًا على جسيمات ألفا، لكن هذا لم يتم إلا بعد عدة سنوات. وفي ذلك الوقت، وبتحريض من رذرفورد، أطلق باحثان من مانشستر، هما هانز جيجر وإرنست مارسدين، حزم من جسيمات ألفا (ناتجة عن التحلل الطبيعي بالنشاط الإشعاعي) على صحائف من رقائق ذهبية، وراقبا طريقة سلوك جسيمات ألفا [٣٩]. انطلق أغلبها في خط مستقيم خلال الرقائق بدون أى تأثير ملحوظ، لكن بعضها انحرف بزاوية كبيرة، أو حتى ارتد عائداً من الطريق التي أتى منه، كما لو كانت قد اصطدمت بشيء صلد. وكان ذلك الدليل التجريبي هو الشيء الذى استند إليه رذرفورد في ابتكاره لنموذج الذرة بالغة الصغر ذات النواة المركزية الصلبة المحاطة بسحابة غير كثيفة من الإلكترونات. وبالمصطلحات المعاصرة، فإن جسيم ألفا يناظر نواة هيليوم، تحتوى على بروتونين ونيوترونين مرتبطين معا بقوة شديدة. وأول استخدام لهذا المصطلح "نواة" بهذا المعنى، جاء من رذرفورد في ١٩١٢، بعد وقت قصير من التجارب التي أجراها جيجر ومارسدين على أشعة ألفا.

وأُضيف عنصر آخر إلى القصة بعد التجارب التي أجراها رذرفورد مع فريدريك سودى في كندا، حيث عمل من ١٨٩٨ إلى ١٩٠٧، وتوصلا إلى أنه في حالة التحلل بالنشاط الإشعاعي فإن ذرات العنصر ذو النشاط الإشعاعي (أو ما يجب أن تسميه الآن نوى هذه الذرات) تتحطم لينتج عنها ذرات (نوى) عنصر مختلف.

فعندما يتحلل الراديوم مثلاً تبث النواة جسيم ألفا واحد (وهو نواة الهيليوم) وتتحول إلى نواة غاز الرادون. والرادون نفسه ذو نشاط إشعاعي مرتفع، فيتحلل بمزيد من السرعة، ويبث أشعة بيتا (إضافة إلى أشياء أخرى)، لكن التفاصيل ليست مهمة هنا. والأكثر أهمية هو الاكتشاف، الذى توصل إليه رذرفورد، بأن التحلل بالنشاط الإشعاعي يحدث دائمًا تبعًا لقانون إحصائي، فبالنسبة لعنصر محدد ذو نشاط

(٣٩) هذا مثال مهم بشكل خاص لكيفية تطور العلم. فلم يمر سوى عشر سنوات بعد اكتشاف بيكريل النشاط الإشعاعي، حتى استخدم رذرفورد وفريقه هذا الاكتشاف في سبر بنية الذرة.

إشعاعي، فإن نصف الذرات بالضبط تتحلل خلال فترة زمنية محددة (يطلق عليها حاليًا نصف العمر) والتي تختلف بين عنصر مشع وغيره. وحتى لو كان نصف العمر أطول من عمر الفرد الإنساني، فإنه يمكن تحديده باختبار النشاط الإشعاعي لعينة من العنصر المشع في المختبر لمدة قصيرة جداً، وقياس كيفية بدء الإشعاع في الاضمحلال.

وتتضمن هذه الدراسات أنه مهما كان عدد الذرات المشعة التي تبدأ بها، فإنه في نصف عمر واحد يتحلل نصف هذا العدد، وفي نصف العمر التالي يتحلل نصف ما تبقى (وهو ربع العدد الأصلي)، وفي نصف العمر التالي يتحلل ثمن العدد الأصلي من الذرات المشعة، وهكذا. وليس هناك شيء سحرى يتعلق بهذا الأمر - فكل ذرة مفردة لا تحتاج إلى "معرفة" ما يحدث للذرات الأخرى. وكل المطلوب بالنسبة لكل ذرة مفردة لعنصر محدد ذو نشاط إشعاعي، أن يكون هناك احتمال خمسين في المائة لأن تتحلل (أو لا تتحلل) في نصف العمر. فإذا كان هناك ما يكفي من الذرات في العينة، يحدث الأمر تلقائيًا بمنطق الحقيقة نفسها التي تقول إن احتمال واحد من ستة احتمالات في أن تحصل على الرقم ٣ على الوجه العلوى إذا دحرجت حجر النرد بحرية، بغض النظر عن دحرجتك لها عدة مرات سابقًا وبغض النظر عن آخر رقم ظهر لك من قبل. وبالنسبة للراديوم، فإن منتصف العمر ١٦٠٢ عام. وأهم ما في الموضوع أن الطاقة الناجمة عن النشاط الإشعاعي لا تستنفد. ولقد بدت هكذا في البداية، لأن التجارب لم تكن بالحساسية الكافية لكي تقيس تدهور النشاط الإشعاعي مع استمرار تحلل العينة الأصلية. لكن إذا كان لديك عينة من الراديوم النقي، محفوظة بإحكام في صندوق مضاد للإشعاع بحيث لا يمكن أن تهرب أية منتجات متحللة، وانتظرت ١٦٠٢ سنة، فإنك ستجد في نهاية هذا الزمن أن الحرارة الصادرة عن خليط المادة المتبقية ستستغرق ساعتين، وليس ساعة، لتذيب مثل وزنها من الجليد.

ويبقى السؤال حول كيفية دخول الطاقة أصلاً إلى النواة النشيطة إشعاعيًا، لكن علماء الفيزياء يعرفون الآن على الأقل أنها كانت طاقة احتياطية محدودة، مثلها مثل حقل الفحم الحجرى أو بئر النفط، وليس خزانًا يستمد طاقته من سحر موجات إثيرية. وكما أوضح رذرفورد مبكرًا في ١٩٠٣، في كتابه "النشاط الإشعاعي"، فإن "الانبعاث

المستمر لطاقة من الأجسام النشطة يأتي من الطاقة الداخلية الكامنة في الذرة". وفي العام نفسه (العام الذي قام فيه كوري ولابورد بقياسات للحرارة الصادرة عن الراديوم)، استطاع رذرفورد، ومعه هوارد برتيس في كندا، أن يوضح أن كمية الحرارة الناتجة خلال النشاط الإشعاعي تعتمد على جسيمات ألفا المنبعثة من مادة نشطة إشعاعياً. وتتصادم جسيمات ألفا مع ذرات (في الواقع مع نوى) مادة قريبة، بما في ذلك الذرات الأخرى للراديوم في العينة، مطلقة طاقتها الحركية على هيئة حرارة.

وحدث أيضاً في عام ١٩٠٣ أن توصل علماء الفلك إلى احتمال أن يكون النشاط الإشعاعي هو الذي يعطي الطاقة للشمس لكي تظل ساخنة. وحسب عالم الفلك الإنجليزي وليام ولسون أنه إذا كان هناك ٣,٦ جرام فقط من الراديوم النقي في كل متر مكعب من حجم الشمس، فإن الطاقة الناتجة عن التحلل النشط إشعاعياً قد يكفي للإمداد بكل الحرارة التي تشع من سطح الشمس الآن. وتم تبني هذه الفكرة ودعمها عالم الفلك جورج داروين، أحد أبناء تشارلز داروين، ومع نهاية ١٩٠٣ حصلت فكرة أن حرارة الشمس ناتجة بالضرورة عن طاقة نشاط إشعاعي على دعم قوي. وكانت هذه الفكرة خاطئة بالطبع، فلو كانت طاقة الشمس ناتجة عن تحلل الراديوم، مثلاً، فإنه بعد ١٦٠٢ من الآن ستبث فقط نصف الطاقة التي تبثها الآن، وفي ٣٢٠٤ عام فقط ربع هذه الطاقة (وبالعكس، لا بد أنها كانت تبث ضعف هذه الطاقة منذ ١٦٠٢ سنة، وهكذا إذا رجعنا زمنياً إلى الخلف). ويضاف إلى ذلك أنه ليس هناك دليل بمنظار الطيف يدل على وجود كميات كبيرة من الراديوم (أو أي عنصر آخر نشط إشعاعياً) في الشمس. لكن ولسون وداروين كانا مخطئين لأسباب مفهومة (تماماً مثل خطأ كلفن وهلمهولتز عندما حسبا إنتاج الطاقة الشمسية)، فقد قدما أفضل ما يمكنهما استنتاجه حول مصدر الطاقة الشمسية مع الوضع في الاعتبار المعرفة التي كانت متاحة لهما. وللمرة الأولى كان علماء الفلك قد ساروا في الاتجاه الصحيح لمعرفة مصدر الطاقة الشمسية - في داخل الذرة - وما كان ينقصهم حتى ذلك الوقت هو معرفة مدى ضخامة كميات الطاقة التي يمكن الحصول عليها من داخل الذرة، وهذا ما وجدوه بعد ذلك بزمن قصير، في أعمال اينشتاين.

نشر أينشتاين نظرية النسبية الخاصة في ١٩٠٥، وهي النظرية التي تقول، بالإضافة إلى الأشياء الأخرى التي تقدمها، إن الكتلة والطاقة يمكن تبديل كل منهما إلى الأخرى، وذلك تبعاً للمعادلة ط = ك ع^٢، أي أن الكتلة "ك" تعادل كمية طاقة "ط" يتم حسابها بضرب الكتلة في مربع سرعة الضوء. وحيث إن سرعة الضوء مرتفعة جداً - ٣٠٠٠٠٠ كم /ثانية - فإنه حتى الكمية الصغيرة جداً من كتلة المادة تساوي كمية بالغة الضخامة من الطاقة [٤٠]. وقبل نهاية عام ١٩٠٥، واجه إينشتاين، في بحث ثان حول نظرية النسبية الخاصة، بشكل محدد مصدر الطاقة المنبعثة في النشاط الإشعاعي، وكتب "إذا بث جسم طاقة "ق" على هيئة إشعاع، تنقص كتلته بمقدار ق/ع^٢" ورغم أن أينشتاين لم يطبق هذه الصيغة الرياضية على الشمس، يمكننا استخدام هذه النسبة لحساب مقدار الكتلة التي تفقدها الشمس كل ثانية لإنتاج الطاقة التي تنبعث من سطحها إلى الفضاء. أنها أقل قليلاً من ٥ ملايين طن من المادة كل ثانية - وهو ما يبدو كمية ضخمة بالمقاييس البشرية، لكنه مجرد لسعة ذبابة بالغة الصغر مقارنة بحجم الشمس تلك التي تبث طاقة بهذا المعدل المذهل لمدة مليار عام لازمة لتحويل نحو واحد من ألف فقط من كتلة الشمس إلى طاقة. ويمكن "للطاقة الذرية" وهي في الواقع "طاقة نووية" أن تحافظ على الشمس ملتهبة لزمن كاف لتفسير الدلائل الجيولوجية والتطورية للعمر الطويل للأرض. ولكن كيف تحول الطبيعة هذه الكمية الصغيرة نسبياً من الكتلة إلى طاقة؟

لم يبدأ علماء الفلك يدركون، إلا في عام ١٩١٩ فقط، أنهم كانوا يسيرون في الطريق الخطأ بالتفكير في إنتاج طاقة النجوم بمصطلحات التحلل بالنشاط الإشعاعي ولقد تأكد لهم ذلك بفضل اكتشاف تجريبي مهم، الذي أتاح دليلاً مهماً جديداً عن طبيعة النوى الذرية. وكان رذرفورد قد قاس، منذ عقد سابق، كتلة جسيم ألفا وتوصل

(٤٠) حيث إن بعض الناس مازالوا يجدون صعوبة في قبول الطبيعة "الشاذة للحس العام" لنظرية أينشتاين، فمن المفيد التأكيد على أنها ليست فكرة حمقاء لبروفيسور مجنون. لكن كل تنبؤات النظرية بما في ذلك العلاقة بين الكتلة والطاقة، تم اختبارها في تجارب عدة مرات منذ ١٩٠٥، وأثبتت النظرية أنها تفسير جيد لطبيعة العالم، حتى أجزاء من الكسر العشري. قد لا تستهويك النظرية، لكن إذا لم تقبلها فإنك تكون في موقف من يعتقد بأن الأرض مسطحة.

إلى أنه يساوى تقريبًا كتلة أربع ذرات هيدروجين. لكن فرانسيس أستون، من مختبر كافندش، قدّم فى ١٩١٩ طريقة أكثر دقة لقياس هذه الكتل (حيث يعتمد على قياس مدى انحراف الجسيمات المشحونة بالمجالات المغناطيسية)، وتوصل إلى أن كتلة جسيم ألفا لا يساوى بالضبط كتلة أربع نوى هيدروجين (أربع بروتونات) معًا. ويوضح القول بأنه "لا يساوى بالضبط" كيف حصلت كل النجوم فى التتالى الرئيسى على شكل هرتز سبرنج رسل، على الطاقة الصادرة عنها.

اكتشف أستون أن كتلة نواة الهليوم أقل بمقدار ٠,٨ فى المائة من كتلة أربع نوى هيدروجين (أربع بروتونات) مجتمعة معًا. وكان ذلك قبل اكتشاف النيوترون، ولم يكن علماء الفيزياء متأكدين تمامًا من تركيب النوى، لكن التخمين المعقول كان أن نواة الهليوم تحتوى على أربع بروتونات، إضافة إلى إلكترونين لمعادلة وحدتى الشحنة الموجبة للبروتونات. وكتلة الإلكترون نحو جزء من ألفين من كتلة البروتون، لذلك فلا تدخل فى الحسابات عند ذلك المستوى، ولا تؤثر على الموضوع. ولأن الأوزان الذرية للعناصر تقترب جميعها بالتقريب من أن تكون مضاعفات الوزن الذرى للهيدروجين، كان من الواضح تمامًا أن ذرات العناصر الأخرى يجب أن تكون مبنية (بطريقة ما) باستخدام الهيدروجين كوحدة بناء أساسية، لكن دقة قياسات أستون (العناصر الأخرى، مثل الهليوم) أوضحت ضياع كتلة بالغة الصغر عبر الطريق. التقط إدينجتون الفكرة، وفى العام التالى ١٩٢٠ خلال لقاء الجمعية البريطانية لتطوير العلم، ذكر التضمينات الكامنة فى هذا الاكتشاف أمام جمهور أثاره الفضول، بل روعته المفاجأة:

> **أى نجم لديه خزان ضخم من الطاقة التى يحصل عليها بطريقة لا نعرفها. ولا يمكن بالتأكيد أن يكون هذا الخزان سوى طاقة تحت ذرية من المعروف أنها موجودة بوفرة فى المادة، ونحلم أحيانًا بأن يتعلم الإنسان كيفية إطلاق هذه الطاقة واستخدامها فى مصلحته. وهذا الخزان لا يمكن أن ينفد تقريبًا، فقط إذا تم التحكم فى السحب منه. وهناك ما يكفى من هذه الطاقة فى الشمس يتيح لها الاستمرار فى بث الحرارة لمدة ١٥ مليار سنة... ويضاف إلى ذلك أن أستون قد أوضح بشكل حاسم أن كتلة ذرة الهليوم أقل من كتل أربع ذرات هيدروجين الداخلة فيها**

> **وبالنسبة لهذا الأمر على الأقل فإن علماء الكيمياء يتفقون معه. هناك فقد فى الكتلة فى عملية التركيب تصل إلى جزء من ١٢٠، ومن المعروف أن وزن ذرة الهيدروجين ١,٠٠٨ والهليوم ٤ فقط. لن أسهب فى برهانه الرائع لهذه النتيجة، حيث يمكنك دون الشك سماعه منه هو نفسه. والآن لا يمكن للكتلة أن تفنى، والنقص فيها لا يمثل سوى كتلة الطاقة الكهربائية التى أطلقت فى عملية التحول. بذلك يمكننا فورًا حساب كمية الطاقة المنطلقة عندما يتركب الهليوم من الهيدروجين. فإذا كان ٥ فى المائة من كتلة الشمس تتكون فى البداية من ذرات الهيدروجين، التى تتحد بالتدريج لتكوين عناصر أكثر تعقيدًا، ستزيد الحرارة الكلية المنطلقة عن حاجتنا، ولن نحتاج إلى مزيد من البحث حول مصدر طاقة الشمس.**

ولقد رصد إدينجتون بدقة، الذى يعتبر مبتكر الانضباط العلمى فى الفيزياء الفلكية، الطريق الرئيسى للتطور عندما قدم هذه التعليقات. لكن التقدم ظل معاقًا لعدة أعوام بسبب وجود مشكلتين، إحداهما نظرية والأخرى تتعلق بالرصد. فمن الجانب النظرى لم يكن أحد يعرف كيف يمكن لبروتونين (فما بالك بأربعة) أن يصبحا قريبين من بعضهما بما يكفى لأن يلتصقا. وكان من الواضح تمامًا أنه رغم التسليم بأنه لا بد من وجود بعض القوى الغامضة التى تجعل النوى الذرية متماسكة معًا، ورغم أن الشحنة الموجبة فى كل البروتونات فى النواة تحاول تفجيرها لفصل مكوناتها عن بعضها البعض (وكان ذلك قبل وقت طويل من المعرفة ولو الضئيلة بالقوة النووية الشديدة)، أن فعل الربط لا يمتد بعيدًا عن النوى، وإلا ستكون النتيجة التصاق كل ما سواها على هيئة كتلة ضخمة واحدة من المادة، مما يشبه نواة واحدة عملاقة. وإذا تصادم بروتونان وجهًا لوجه وتلامسا، فقد يلتصق كل منهما بالآخر. ولكن حيث إن كل منهما لديه شحنة موجبة، فإنهما يصدان بعضهما البعض بقوة مثل تلك الناتجة عن قسمة واحد على مربع المسافة بينهما، ويصبحان أكبر وأكبر كلما اقتربا من بعضهما. فكيف إذن تستطيع ذرات الهيدروجين أن "تتحد بالتدريج لتكوين عناصر أكثر تعقيدًا"؟

وكانت المشكلة الأخرى تتمثل فى سوء فهم جعل إدينجتون وزملاءه يسيرون فى الطريق الخاطئ عندما حاولوا استنباط تفاصيل حول نوع العمليات تحت الذرية التى

تحدث داخل النجوم. وفى هذا الحديث أمام الجمعية البريطانية فى ١٩٢٠، أشار إدينجتون إلى احتمال أن يكون ٥ فى المائة من كتلة النجم مصنوعة من الهيدروجين. وكان هذا التخمين، يضاف إليه احتمال أن كل الهيدروجين قد تحول إلى هليوم، وراء العمر المقدر الذى توصل إليه إدينجتون ومقداره ١٥ مليار سنة. ولكن لماذا اختيار ٥ فى المائة؟ لأنه فى بداية العشرينيات من القرن العشرين كان علماء الفلك يرون أن تركيب الشمس والنجوم كان - بشكل عام - مشابه لتركيب الأرض. وكان ذلك جزئيًا نوع من ضيق أفق التفكير، يتبنى افتراض غير مؤكد مؤداه أن الأجرام الأخرى فى الكون مصنوعة من نوع المادة نفسها التي صنعنا منها. لكنه كان أيضًا سوء فهم جزئى لهذه الغابة من الخطوط فى طيف الشمس، التى تشير إلى وجود تنوع ضخم من العناصر فى جو أقرب النجوم إلينا. وعلى أية حال، فإنه بالمقاييس المعترف بها فى عام ١٩٢٠ كان إدينجتون مخطئ إلى أقصى درجة باقتراحه أن ما يقرب من ٥ فى المائة من كتلة الشمس من الهيدروجين.

وتم حل كلا المشكلتين فى النصف الثانى من العشرينيات من القرن العشرين، وذلك عندما انطلقت بشكل فعلى دراسات البنية الداخلية للنجوم. ولكن فى غضون ذلك الوقت كان إدينجتون قد أوضح الطريق بإنجاز أول حسابات لدرجات الحرارة التى لا بد من وجودها فى قلب النجوم، باستخدام علم فيزياء بسيط جداً (مدرسى فى الواقع) وكمية ضخمة من التبصر، إضافة إلى كمية متزايدة من المعلومات حول العلاقة بين الكتل وقوة إشعاع نجوم التتالى الرئيسى. وأدرك إدينجتون أن الإنسان ليس فى حاجة إلى معرفة مصدر طاقة النجم لكى يصل إلى فكرة تقريبية عما يحدث داخله. وأدرك أيضًا أن القوانين الأساسية للفيزياء التى تصف ما يدور داخل نجم ما هى إلا قوانين تصف سلوك الغاز الساخن ،وهو من أبسط المنظومات التى أنجز فى بحثها علماء الفيزياء أفضل الدراسات. ويبدو ذلك مدهشًا للوهلة الأولى، حيث إن متوسط كثافة الشمس أعلى من كثافة الماء بمقدار مرة ونصف، والكثافة فى مركزها أكثر عدة مرات من كثافة الرصاص. لكن الغاز الذى تتكون منه النجوم لا يشبه الهواء الذى نتنفسه.

يُوصف الغاز العادى بقوانين ومعادلات بالغة البساطة لأنه يسلك مثل مجموعة من الكرات الصغيرة الصلبة (الذرات) تثب هنا وهناك وتتصادم ببعضها البعض وبجدران الحاوى الذى يحبس الغاز داخله. وبالنسبة لمادة صلبة - مثل الرصاص - ترتبط الذرات بإحكام ببعضها البعض، ولا تتحرك كثيراً. ولكن كما شرحنا فى الفصل

الثانى، فإن نواة الذرة أصغر بكثير من الذرة نفسها. وعندما ترتفع حرارة مادة ما (مثل الهيدروجين أو الرصاص أو أى مادة أخرى) إلى درجة كافية، تطرد طاقة التصادم بين الجسيمات وتأثير الإشعاع الكهرومغناطيسى الناتج من التفاعل مع الجسيمات المشحونة، الإلكترونات من الذرات، تاركة النوى عارية خلفها. ويطلق على الخليط الناتج المتكون من نوى موجبة الشحنة والكترونات سالبة الشحنة اسم البلازما، وهى تسلك مثل الغاز لأنه يكون لدينا حينئذ نوى تسلك مثلها مثل الكرات الصغيرة الصلبة تثب هنا وهناك وتتصادم ببعضها البعض. والفرق فى الحجم بين الذرة والنواة ضخم جداً لدرجة أن البلازما تستمر تتصرف مثل الغاز المثالى، حتى لو كانت الكثافة أكبر بكثير من تلك الموجودة فى قلب الشمس.

ونعرف من خلال القوانين الخاصة بسلوك الغاز المثالى مقدار السخونة داخل نجم ذو كتلة وقوة إشعاع محددين، حتى يمكنه التماسك فى مواجهة الجاذبية التى تسحبه إلى الداخل. ويحدث فى الواقع نشاط توازن أكثر تعقيداً مما ذكرنا. حيث ينتج الضغط العادى من الجسيمات التى تثب داخل النجم هنا وهناك وتتصادم ببعضها البعض، وبسبب الجسيمات المشحونة يتم إشعاع كمية ضخمة من الطاقة الكهرومغناطيسية - مثل الأشعة السينية وأشعة جاما. ويتفاعل هذا الإشعاع مع الجسيمات المشحونة الأخرى فى البلازما، مما ينتج عنه ضغط إضافى، يطلق عليه اسم ضغط الإشعاع. فإذا تقلصت كرة غازية فى الفضاء وارتفعت الحرارة داخلها (ويحدث ذلك فى البداية نتيجة انبعاث طاقة جاذبية، تماماً كما أوضح كلفن وهيلمهولتز)، سيتبع مصيرها أحد ثلاثة احتمالات. قد لا تصبح كرة الغاز الصغيرة بالغة السخونة من الداخل، فتتبدد مبتعدة الطاقة الحرارية على هيئة أشعة، وتبرد الكرة على المقياس الزمنى الذى قدمه كلفن وهيلمهولتز. وينتهى بها الأمر إلى أن تصبح كرة غازية باردة، مثلها مثل كوكب المشترى، أو ما يطلق عليه القزم الأسمر. الذى قد تكون كتلته أكبر من المشترى بمقدار ٧٠ مرة (لكن كتلته لا تتجاوز ٧ فى المائة من كتلة شمسنا). وهو "يقترب من أن يكون نجم" فشل فى تحقيق عمليات الاندماج النووى الذى يتيح لنجوم التتالى الرئيسى أن تستمر ساطعة. وفى الطرف الآخر، يتولد عن الكرة الغازية الكبيرة كمية ضخمة من الحرارة وهى تتقلص فينتج عن ذلك بلازما فى قلبها، لذلك لا تستقر أبداً على هيئة نجم تتالى رئيسى. ولكن ما بين هذين الحدين هناك نطاق صغير من الكتل التى تجعل

الكرة الغازية تصل إلى حرارة كافية لكى تتشكل البلازما (وتعرف الآن التفاعلات النووية التى تولد حرارة داخلها)، لكنها لا تصل إلى حرارة عالية قد تحطمها وتحيلها إلى شظايا. والنجوم المستقرة تبعًا لهذا الوصف هى فقط تلك التى لها كتلة فى نطاق يتراوح بين عشر كتلة الشمس أو مائة ضعف كتلة الشمس - وينتج ذلك من القوانين البسيطة لفيزياء الغاز (البلازما)، أيًا كانت العملية التى تتبعها النجوم فعلاً لتوليد الحرارة داخلها. ومما يسر علماء الفلك أننا عندما ننظر إلى النجوم لا نجد فعلا ما هو أقل من عشر كتلة الشمس، ولا ما هو أكبر مائة مرة من كتلة الشمس، فالكون يعمل فعلاً تبعًا للقوانين الفيزيائية نفسها التى ندرسها فى المختبرات هنا على الأرض.

وعندما تجرى حسابات، كما فعل إدنجتون، يمكن أن تتوصل حتى إلى درجة الحرارة التى لا بد أن تكون موجودة داخل أى نجم حاليًا، إذا عرفت كتلته وقوة إشعاعه وتركيبه. ويجئ التركيب هنا لأنه يؤثر على عدد الكرات الصغيرة الصلبة التى تثب هنا وهناك داخل النجم الذى يحافظ الضغط عليه. فإذا كان هناك عدد أقل من الجسيمات فإن على كل منها أن يتحرك بشكل أسرع للمحافظة على الضغط الكلى نفسه - مما يعنى أن تصبح هذه الجسيمات أكثر سخونة. والأكثر أهمية هو عدد النويات الذرية، التى تتصرف كل منها كما لو كانت جسيماً فى هذه الحسابات. وحيث إن كل نواة هليوم مكونة بشكل أساسى من أربع نوى هيدروجين، فإن نجماً يكون مثلاً مكونًا فى مجمله من الهيدرجين سيكون فيه أربعة أضعاف عدد الجسيمات التى تثب هنا وهناك داخل النجم مقارنة بنجم له الكتلة نفسها بالضبط لكنه مكون فى مجمله من الهليوم (فإذا كان هناك نجم مكون كله من الراديوم، وله كتلة ذرية ٢٢٦، فإنه سيحتوى على نسبة ٢٢٦/١ فقط من عدد النوى مقارنة بنجم له الكتلة نفسها ومكوّن كله من الهيدروجين). وبالطريقة نفسها تحدث الأمور الأخرى، فقد يكون نجم الهيليوم أكثر سخونة فى قلبه مقارنة بالنجم الهيدروجينى (ويظل نجم الراديوم بالتالى أكثر سخونة)، لكى يظل محافظاً على نفسه فى مواجهة سحب الجاذبية له إلى الداخل.

ولأن إدنجتون لم يكن يعلم أن النجوم فى التتالى الرئيسى يتكون أغلبها من الهيدروجين والهيليوم، فإنه عندما أجرى حساباته حصل على رقم لدرجة الحرارة المركزية لنجم فى التتالى الرئيسى كان مرتفعًا جداً، - نحو ٤٠ مليون درجة كلفن

(التى تعتبر بالنسبة لكل الأغراض العملية مماثلة لدرجة حرارة ٤٠ مليون درجة مئوية) لكن ذلك لم يكن مهماً، والأكثر أهمية كان ما اكتشفه، بواسطة العلاقة بين الكتلة وقوة الإشعاع وقوانين فيزياء الغاز، حيث اكتشف أن كل نجوم التتالى الرئيسى لها من حيث المبدأ درجة الحرارة المركزية نفسها. لقد كان واضحاً أنه اكتشف سمة أساسية مهمة لما يحدث داخل النجوم. وفى كتابه "البنية الداخلية للنجوم"، الذى نُشر فى ١٩٢٦، أشار إلى مثالين محددين للنجوم التى درسها وكتب قائلاً:

> **إذا أخذنا الأمر من جانبه الظاهرى فإن "ذلك" يوضح أنه لو كان من الضرورى وجود إمداد مقداره ٦٨٠ إرج لكل جرام (مثل ٧ Puppis) أو إمداد ٠,٠٢٨ إرج لكل جرام (مثل Krueger 60) فلا بد أن ترتفع درجة حرارة النجم إلى ٤٠٠٠٠٠٠٠ درجة مئوية لتحقيق هذا الإمداد، وعند هذا الحد ينشأ إمداد لا حدود له.**

وفى مكان لاحق فى الكتاب، استفاض قائلاً حول هذا الموضوع:

> **يتقلص (النجم) حتى تصل درجة حرارته المركزية إلى ٤٠ مليون درجة عندما ينطلق فجأة مخزونه الرئيسى من الطاقة .. ولا بد أن يحافظ النجم (فى التتالى الرئيسى) على ما يكفى فقط من مادته أعلى من درجة الحرارة الحرجة للتزود بالإمداد المطلوب.**

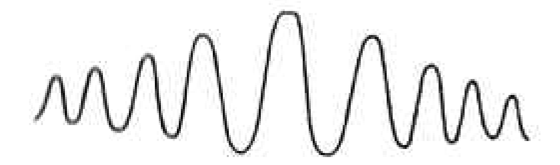
وأهم ما فى الموضوع، بغض النظر عن درجة الحرارة الدقيقة التى نتجت عن الحسابات، هو ما تتضمنه النتائج من أن كل نجوم التتالى الرئيسى، بما فيها الشمس، تحصل على طاقاتها بالطريقة نفسها بالضبط. ومن المثير أن الكتاب نُشر فى وقت ظهور الأفكار الجديدة نفسه التى أتى بها علماء الفيزياء الكمية حول الطريقة التى تسلك بها جسيمات مثل البروتونات، وما أسرع ما أوضح ذلك كيفية تغلب عملية الاندماج على التنافر الكهربائى بين البروتونات. ولأن إدنجتون بقى فى الوقت المناسب دائمًا فإنه قال فى مقدمة تعود إلى يوليو ١٩٢٦: "فى طريقنا للطباعة ظهرت (نظرية كمية جديدة) قد يكون لها إسهامات مهمة فى المشاكل المتعلقة بالنجوم بعد أن يطالها مزيد من التطور". وكان على حق

وأهم سمة للنظرية الكمية التي ظهرت في النصف الثاني من العشرينيات، وأصبحت حجر أساس للفيزياء منذ ذلك الحين، هو أنه في المستوى ما تحت الذرى لا تتصرف الهويات الكمية لأشياء مثل البروتونات والإلكترونات بالطريقة نفسها بالضبط التي تتصرف بها الكرات الصلبة الصغيرة. إنها تتصرف مثل خليط من الموجة والجسيم (وهي ظاهرة تعرف باسم ثنائية الموجة - الجسيم). إنها تسلك بالطريقتين - فالضوء، الذي وصفه علماء الطبيعة في القرن التاسع عشر معتمدين فقط على مصطلحات الموجات الكهرومغناطيسية (وهي الطريقة التي وصفته بها حتى الآن)، يسلك أيضًا كما لو كان تيارًا من الجسيمات بالغة الصغر، يطلق عليها فوتونات، والإلكترونات التي وصفها ج.ج. تومسون كجسيمات صغيرة، تسلك أيضًا مثل الموجات. وليس المكان مناسب هنا لتناول مزيد من التفاصيل (التي غطيتها في كتابي "بحثًا عن قطة شرودنجر")، ولكن بالنسبة لنظرة النسبية فقد أثبتت كثير من التجارب، على مستوى بالغ الصغر، أن العالم الكمي (عالم الذرات وما هو أصغر منها) يسلك فعلاً بهذه الطريقة. وهذا السلوك يرتبط أكثر بالجسيمات الأقل حجمًا، ولا يظهر البتة على مستوى الأشياء التي نراها بعيوننا، مثل مكعبات السكر أو الحيوانات وحيدة القرن. والأكثر أهمية أن البصيرة التي تتيحها لنا النظرية الكمية توضح لنا أنه ليس من المناسب النظر إلى البروتون على أنه كرة بالغة الصغر لها حواف محددة تمامًا وبدلاً من ذلك من الأفضل كثيرًا أن نتصوره على أنه تركيز من طاقة الكتلة وشحنة كهربائية تصاحبها مجموعة صغيرة من الموجات، يطلق عليها حزمة موجة.

ولقد توصل عالم فيزياء روسي شاب في ١٩٢٨، وكان في زيارة لجامعة جوتينجين، إلى أن الموجية التي تتصف بها الهويات الأساسية يمكن أن تفسر كيفية حدوث النشاط الإشعاعي - كيف تهرب جسيمات ألفا من النواة الذرية خلال الانحلال بالنشاط الإشعاعي. والأمر المحير أنه حتى في النواة النشطة إشعاعيًا تكون القوة الشديدة التي تحافظ على النواة متماسكة، تبعًا للحسابات التي لا تضع هذه التأثيرات الكمية في اعتبارها، شديدة القوة إلى الحد (فقط إلى الحد) الذي يتيح لجسيمات ألفا أن تفلت. ولن يتأثر جسيم ألفا الذي أصبح على التو خارج النواة بالقوة الشديدة، ويتم طرده من النواة، لأن كلاً من النواة وجسيم ألفا لهما شحنة موجبة. لكن في داخل

النواة تتماسك كل الجسيمات بالقوة الشديدة، التي تتغلب على التنافر الكهربائي. ويبدو الأمر كما لو كانت الجسيمات موجودة على فوهة بركان - فليس لجسيمات ألفا ما يكفي من الطاقة للصعود خارجة من البركان والتدحرج هابطة على سفوح الجبلية المنحدرة.

لكن جورج جامو توصل إلى أن الطبيعة الموجية لجسيم ألفا تعني بشكل ما، أنه على درجة من الضخامة تجعله غير متناسب بإحكام مع فوهة البركان. ويمكن لبعض التموجية أن تمتد إلى الجانب الآخر من "الجبل"، لدرجة أن "جسيم" ألفا يمكنه أن يتسرب بالتدريج (على مقياس زمني يرتبط بنصف العمر) من خلال الجبل إلى الجانب الآخر. عندئذ يمكنه التدحرج مبتعدًا حيث إنه مطرود بواسطة الشحنة الموجبة للنواة. ويطلق على هذه الظاهرة، لأسباب واضحة، "ظاهرة النفق". ورغم أنني اكتفيت بتقديم الخطوط العامة لهذه الفكرة هنا، أقول من جديد إن الحسابات الدقيقة للنظرية الكمية تتنبأ بالضبط في الواقع بكمية إشعاع ألفا (أنصاف الأعمار الصحيحة، وطاقة) المصاحبة لعبور النفق بعيدًا عن النواة الذرية، كما هو الحال في الراديوم، وهو ما لاحظناه بالفعل.



شكل (٤ - ٢) أظهرت الفيزياء الكمية أن الهويات التي كان يُنظر إليها على أنها جسيمات نقطية بالغة الصغر (مثل الإلكترونات والبروتونات) يجب النظر إليها على أنه منتشرة على حجم في المكان أقرب ما تكون إلى نبضة قصيرة من الموجات (حزمة موجة).

لقد كانت مادة مثيرة بالنسبة لعلماء فيزياء الجسيمات. لكن جامو توصل أيضًا إلى أن العملية يمكن أن تتخذ مسارًا مختلفًا. فإذا اقترب بروتونان موجبا الشحنة من بعضهما اقترابًا كافيًا، حتى لو لم يكن قلنا حزمتي الموجة الموجبتان الشحنة

متلامسان، يمكن للحواف الممتدة للحزم الموجية أن تتداخل. ويمكن لهذا التداخل أن يسحب الموجتين معاً، ومع ذلك فإن الجسيمات البسيطة التي تقترب من بعضها البعض بكمية الطاقة نفسها (السرعة نفسها) لا يمكنها أن تتلامس أبداً وتصبح تحت تأثير القوة الشديدة. ويشبه الأمر هنا شخصان يعومان في البحر، اقتربا من بعضهما وتصافحا، يسحب كل منهما نفسه نحو الآخر رغم أن الموجات تحاول الفصل بينهما. ونقل جامو هذا الأمر فوراً إلى أصدقائه علماء الفلك، وقرر اثنين منهم استخدام ظاهرة النفق لمحاولة تفسير كيفية إنتاج الاندماج الذرى للطاقة داخل النجوم. لكنهما ظلا عاجزين لأنهما فكرا في البداية في مدخل يرتبط بنواة الهيدروجين (البروتونات) والتفاعل مع نوى أكبر (مثل العملية العكسية لتحلل ألفا)، بدلاً من التفكير انطلاقاً من البروتونات في تفاعلها مباشرة مع بعضها البعض.

واستهلكت فكرة أن الهيدروجين لا بد أن يكون العنصر الرئيسي في تركيب النجوم وقتاً بالغ الطول، رغم أن الدليل الواضح على ذلك قد ظهر أيضاً في ١٩٢٨، في العام نفسه الذي توصل جامو خلاله إلى فكرة الظاهرة النفقية.

وهذا مثال آخر للفكرة العلمية التي تظهر بناء على تقنية جديدة عندما يحل الوقت المناسب. وجاءت الفكرة الأولى بأن الغلاف الجوى للشمس والنجوم غنى بالهيدروجين من أبحاث سيسيليا باين (ولاحقاً سيسيليا باين جابوسشكين)، وهي عالم فلك إنجليزية المولد حصلت على درجة الدكتوراة من كلية رادكليف في ١٩٢٥ لأبحاثها حول العلاقة بين درجات حرارة النجوم والطيف. وضمن ما تضمنته رسالتها للدكتوراة، ملاحظتها، باستخدام منظار الطيف، أن تركيب الغلاف الجوى للنجوم يهيمن عليه الهيدروجين.

شكل (٤ - ٤) إذا اقترب بروتونان (أو نوى أخرى) من بعضهما بسرعة معينة، سوف يمنعهما من التلامس والتفاعل التنافر الكهربائي الناتج عن شحنتيهما الكهربائيتين _ إذا كانا جسيمان. ولكن إذا كانا حزمتين موجيتين فإن طرفي الحزمتين قد يتداخلا عبر جبهة أطول. وهذا ما يجعل الاندماج النووي ممكناً عند درجات الحرارة الموجودة داخل الشمس والنجوم الأخرى. ويعتبر وجود النجوم إثباتاً لدقة الوصف الكمي لطبيعة "الجسيمات" الشبيهة بالموجات.

ويمكن النظر إلى هذا الأمر بعد حدوثه على أنه من أول الدلائل على الانتشار الواسع للهيدروجين في الكون المرئي. لكن الذي ناقش رسالتها للدكتوراة أصر على أنها عندما نشرت رسالتها، كانت الرسالة تتضمن تعليقاً على ظاهرة أن كثافة خطوط الهيدروجين في الطيف الذي درسته لا بد أنها ناتجة عن سلوك ما غريب الهيدروجين تحت تأثير الشروط النجمية، أكثر من كونها منتشرة على نطاق واسع[41]. ومع ذلك أنجز عالم الفلك الألماني ألبريتش أنسولد، في ١٩٢٨، بحثاً تفصيلياً بالمنظار الطيفي عن الضوء الآتي من الشمس، وبعد أن أخذ البيانات على معناها الظاهري، فسَّر قوة خطوط الهيدروجين على أنها تتضمن وجود ذرات الهيدروجين بأعداد تتضاعف ملايين المرات تقريباً شأنه شأن وجود أي ذرات أخرى هناك في الشمس. وبعد عام واحد فقط، توصل عالم الفلك البريطاني وليام مككرى إلى نتيجة مماثلة، مستخدماً تقنية منظار طيف مختلفة.

وقد لاقى الاكتشاف الثلاثي ترحيباً لدى علماء الفيزياء الفلكية، لأنه يوضح أن هناك وفرة من الهيدروجين في الشمس، وهي كبيرة بالتأكيد بما يكفي للإمداد بالطاقة المطلوبة للمحافظة على السطوع بالمستوى نفسه لمدة زمنية تصل إلى مليارات السنوات - كما قال إدنجتون - تقوم بتحويل الهيدروجين في النوى إلى نوى هليوم. ومع ذلك لم يدرك أحد، خلال عقدين، أن هذه الدراسات حول الغلاف الجوى للشمس كانت تكشف لعلماء الفلك أن "قلب" الشمس يهيمن عليه الهيدرجين أيضاً (وهذا يتضمن أن النجوم الأخرى مصنوعة بشكل رئيسي من الهيدروجين، أكثر من كونها تحتوى فقط على كمية كبيرة من الهيدروجين في أغلفتها الجوية). ولكن رغم هذا الارتباك ورغم الكثير من

(٤١) وأشارت في بحثها العلمي الذي اعتمد على موضوع رسالتها للدكتوراة ونشر في ١٩٢٥، إلى أنها قالت فعلاً، مستخدمة كلمات قيلت على لسانها بواسطة ممتحنها والتي تشير إلى الهيدروجين والهليوم: "إن الانتشار الواسع لهذين العنصرين في الغلاف الجوى للنجوم ليس حقيقي بالتأكيد". وكانت سيسيليا باين عالمة فلك من الطراز الأول، حتى وهي طالبة، وأدركت أنها قد عثرت بالفعل على شيء مهم عن تركيب النجوم. وتشير حقيقة أن ممتحنها (هنري نوريس راسل) وجد مشكلة في فهم ما يوضحه الطيف لها، إلى مدى الصعوبة التي كانت تواجه علماء الفلك في العودة إلى فكرة أن النجوم ليست مصنوعة بشكل أساسي من المادة نفسها التي صنعت منها الأرض.

الخطوات المضللة على طول هذا المسار، فإنه مع حلول نهاية الثلاثينيات، أى بعد أكثر قليلاً من عشر سنوات إثر اكتشاف ظاهرة النفق، توصل علماء الفيزياء الفلكية إلى طريقتين، وليس طريقة واحدة، لتحويل البروتونات، أربع منها فى المرة الواحدة، إلى نوى هليوم فى قلوب نجوم التتالى الرئيسى.

الفصل الخامس

الدورات والتسلسلات فى النجوم

نشر جورج جامو اكتشافه لظاهرة النفق فى ١٩٢٨، وفى العام التالى نشر عالما فيزياء شابين هما روبرت أتكينسون وفرانز هوترمانس، أول حسابات حول كيفية حدوث ظاهرة النفق داخل النجوم. وتبدأ حساباتهما بالكلمات "توصل جامو حديثًا إلى أن الجسيمات موجبة الشحنة يمكنها أن تخترق النواة الذرية حتى لو كان الاعتقاد التقليدى يرى أن طاقتها لا تتيح لها ذلك"، وبواصلا حساب نوع التفاعلات الذرية التى يحتمل مشاركتها فى هذه العملية. وأوجزت هذه الجملة الافتتاحية مدى القفزة التى أنجزتها أعمال جامو، وأوضحت الطريق الذى مازال على علماء الفيزياء الفلكية شقه لكشف أسرار الاندماج النووى داخل النجوم. فرغم نشر دراسة أونسولد لتركيب الغلاف الجوى الشمس فى ١٩٢٨، ومساهمة مككرى التى ظهرت فى العام نفسه مثل بحث أتكينسون وهوترمانس، فإنهم كانوا ما يزالون، كما أوضحت هذه الجملة الافتتاحية، يفكرون على أساس أشياء مثل التحلل العكسى لألفا، إضافة إلى جسيمات بسيطة تخترق نوى العناصر الثقيلة. وتبعًا لمقدمة آرثر إدنجتون، اقترحوا أن تكون العملية الأساسية التى تمد بالطاقة الصادرة عن النجوم هى فى الواقع تحويل لأربعة بروتونات إلى نواة هليوم واحدة (جسيم ألفا واحد). لكنهم لم يقترحوا أن يحدث ذلك مباشرة، واستخدموا، على الأرجح، المثال التشبيهى الخاص "بقدر" الطهو. فهذا "القدر" يمكن أن يكون نواة ثقيلة فى قلب نجم مثل الشمس، والذى يمتص المقومات (أربعة بروتونات والكترونين) مما يحيط به واحداً فى كل مرة، ويطبخها لإنتاج نواة هليوم، ويبصقها عندئذ، خلال تحلل ألفا، مستعداً لتكرار العملية بأكملها

وكان أهم ما فى عمل أتكينسون وهوترمانس أنهما وضعا أرقاماً فى حساباتهما، أرقام مستندة إلى الفهم المتنامى لظاهرة النفق التى كانت فى طريقها للانبثاق من الجمع بين الدراسات التجريبية لعمليات مثل تحلل ألفا والنظرية الكمية الجديدة المنتمية إلى العشرينيات. وحيث إن النجوم هى الأجرام الأضخم التى يمكننا رؤيتها بأعيننا، بينما تتعامل الفيزياء الكمية مع موجودات أكثر صغراً بكثير من الذرات، يعتبر القول بأن الفيزياء الكمية تفسر طريقة عمل النجوم إعلاناً مؤثراً حول مدى ترابط فهمنا العلمى للكون على كل المستويات - وإثبات مهم يدل على أن كل المسعى العلمى يسير على الطريق الصحيح.

إذا فكرت فى التنافر الكهربائى بين جسيمين مشحونين بشحنتين موجبتين يقتربان من بعضهما البعض كحاجز فيزيائى مثل التل، فإنه من الواضح تماماً أن التل سيكون من الارتفاع والصلابة، بحيث يصعب اختراقه إذا كان الجسيمين شحنة موجبة أكبر، وأن الأمر سيكون أكثر سهولة أيضاً بالنسبة لجسم لكى يخترق الحاجز إذا كانت سرعته أعلى. وعند درجة حرارة ما، فإن الجسيمات الأخف تتحرك بسرعة أكبر من الجسيمات الأكثر ثقلاً. ومن الحسابات التى كان قد أجراها إدنجتون وآخرون حول بنية النجوم، عرف أتكينسون وهوترمانس بشكل تقريبى نطاق درجات الحرارة الموجودة، ونطاقى الكثافات والضغوط الموجودة فى قلب النجوم. بذلك توصلا إلى معرفة مدى سرعة حركة الجسيمات الموجودة هناك، ومدى شدة تصادم الجسيمات مع بعضها البعض. وأوضحا أنه رغم إمكانية الاختراق الناتجة عن ظاهرة النفق، تحت تأثير الشروط السائدة داخل نجوم التتالى الرئيسى، فإن الجسيمات التى تتحرك بسرعة عالية، ذات الشحنات الموجبة الأصغر (أو بتعبير آخر، البروتونات، نوى الهيدروجين)، هى فقط التى يمكنها اختراق الحواجز. ولا بد أن تتضمن العمليات التى تحافظ على النجوم ساطعة (على الأقل نجوم التتالى الرئيسى) الهيدروجين بشكل مباشر، ولا يمكنها أن تعمل وحدها خلال التصادم بين أزواج النوى الضخمة تلك التى تعيد تنظيم نفسها وتبصق جسيمات ألفا.

ومما يصيب بالصدمة أن ندرك مدى الصعوبة التى يواجهها نجم فى التتالى الرئيسى لكى يحصل على طاقة بهذه الطريقة. وكلما نظرت إلى الأرقام بنفسى، أصاب

بالدهشة أمام مدى ضعف هذه العملية المعتمدة على آلية توليد الطاقة فى النجوم. وفى التحليل النهائى يبدو الأمر غريباً، حيث الشمس هى أكثر المصادر إسرافاً فى الطاقة من بين أقرب جيراننا. كيف يصبح من الممكن القول بأنها "ضعيفة"؟ ولو اعتبرنا ذلك صحيحاً، فأولاً، يتحرك بعض البروتونات داخل نجم مثل الشمس أسرع من نظائرها فى النجوم الأخرى - ويعتمد التوزيع الكلى للسرعات على درجة الحرارة، وهو ما يعطينا السرعة المتوسطة للجسيمات، ونحصل (بكل دقة) على نسبة كمية اختلاف الحركة (٢٠ فى المائة مثلاً) سيان كانت أسرع أو أبطأ من السرعة المتوسطة. وأوضح تحديث الحسابات الذى أنجزه أتكينسون وهوترمانس الحصول على فهم جديد لطريقة عمل النجوم، أنه (عند درجات الحرارة الموجودة داخل قلب الشمس) سيندمج بروتونان مع بعضهما البعض، حتى ولو بمساعدة ظاهرة النفق، فقط إذا كان أحدهما يتحرك على الأقل بسرعة أكبر بخمس مرات من السرعة المتوسطة. وحتى بالنسبة لهذه الجسيمات التى تتحرك بسرعة، فإن الاندماج يحدث فقط عندما يكون التصادم وجهاً لوجه تماماً فى معظم الحالات. فإذا كانت هناك أية زاوية بين مسارات الجسيمات، فإنهما يضربان بعضهما ضرباً طائشاً، وينطلقان على مساريهما. وبالنسبة للشمس نفسها، فإن بروتوناً واحداً فقط من بين كل مائة مليون يكون لديه السرعة العالية الكافية؛ لأن تتيح له القدرة على اختراق الحاجز حول بروتون آخر، وينتج عن تصادم واحد فقط من بين ١٠ مليار تريليون (١ من بين $١٠^{٢٢}$) حدوث عملية الاندماج. وهذا يعنى، فى المتوسط، أن البروتون المفرد سيستغرق ١٤ مليار سنة يتحرك هنا وهناك فى داخل الشمس، يتصادم مع الجسيمات الأخرى ويرتد عنها، قبل أن يتيح له تصادم وجهاً لوجه أن يندمج مع شريك آخر. وحتى فى قلب الشمس، يعتبر الاندماج النووى عملية بالغة الندرة إذا كان الأمر يختص بالبروتونات المفردة. لكن هناك الكثير جداً من الجسيمات داخل الشمس حيث يوجد ما يكفى من البروتونات لإتاحة ٦١٦ مليون طن من الهيدروجين للمشاركة فى مثل هذه التصادمات كل ثانية، وينتج بذلك ما يكفى من جسيمات ألفا لظهور ٦١١ مليون طن من الهليوم، مع تحول ٥ ملايين طن من الكتلة إلى طاقة. وتعتبر هذه الكتلة نسبة بالغة الضآلة من كتلة الشمس، بحيث إنه بعد ٥ ، ٤

مليار عام من عمر نجم التتالى الرئيسى، يكون قد تحول ٤ فى المائة فقط من مخزونة الأصلى من الهيدروجين إلى هليوم.

ولقد ساهم أتكينسون فى دفع عملية تطوير نظرية الاندماج داخل النجوم بمجهوده الخاص فى وقت مبكر من الثلاثينيات، فى الوقت الذى طور فيه هوتيرمانس جوانب أخرى. ولقد درس أتكينسون الأنواع المختلفة للتفاعل النووى، حيث تخترق نوى الهيدروجين نوى العناصر الأخرى، مستخدماً مزيجًا من الحسابات النظرية وبيانات التجارب. ورغم ذلك فقد أوضح، فى ١٩٣٦، أنه تحت تأثير الشروط السائدة فى داخل الشمس، فإن التفاعل النووى الأكثر شيوعًا هو تفاعل يحدث خلاله اجتماع بروتونين معًا لتكوين نواة ديتريوم (هيدروجين ثقيل)، ولم يكن علماء الفلك قد تأكدوا بعد من أن الهيدوجين يؤلف جزء كبيراً إلى هذه الدرجة من حجم الشمس.

ويعود ذلك إلى تزامن سئ الحظ، فبعد أن أثبت أنسولد ومككرى أنه لا بد من وجود كمية كبيرة من الهيدروجين فى الشمس (وفى نجوم التتالى الرئيسى بالتالى)، أعاد علماء الفيزياء الفلكية الحسابات الرائدة حول بنية النجوم التى سبق أن أجراها إدنجتون، وهُذبت فى الثلاثينيات بواسطة عالم الفيزياء الفلكية المولود فى الهند سوبراهمانيان شاندراسيخار. واعتمدت هذه الخطوة الثانية فى فهم بنية النجوم على عدد الإلكترونات داخل النجم – أو بشكل أوضح –على عدد الإلكترونات لكل نوية، حيث يشير المصطلح "نوية" إلى البروتونات أو النيوترونات. وهذا أمر مهم بسبب الطريقة التى يتفاعل بها الإشعاع الكهرومغناطيسى مع الجسيمات المشحونة. ويأتى جزء من الضغط الذى يحافظ على النجم متماسكًا من هذا التفاعل، وكلما زاد عدد الإلكترونات والبروتونات المتوافرة زاد تأثير هذا الضغط الناتج عن الإشعاع. وإذا كان نجم ما مكون فى مجمله من الهيدروجين، سيكون هناك إلكترون واحد لكل بروتون – إلكترون واحد لكل نوية، حيث لا يوجد نيوترونات بالمرة. وإذا كان النجم مكون كله من الهليوم، سيحتوى كل جسيم من جسيمات ألفا بمفرده على بروتونين ونيوترونين، ويظل هناك إلكترون واحد لكل بروتون، ولكن يصبح هناك نصف إلكترون لكل نوية، ومنذ ثم لن يكون للنيوترونات إلكترونات شريكة. وينخفض عدد الإلكترونات لكل نوية كلما زادت نسبة العناصر الأكثر ثقلاً، مما يؤثر على توازن النجم مع الضغط المصاحب للإشعاع

الكهرومغناطيسى (وكذلك الأمر بالطبع بالنسبة للتأثير الواقع على بنية النجم عندما تكون النيوترونات والبروتونات محشورة معًا فى النواة الثقيلة. وهذا ما أشرت إليه سابقًا). وإذا ظننت أن علماء الفيزياء الفلكية كانوا يتصفون بالبطء إلى حد ما فى إحراز تقدم فى هذا المجال، بعد أن مهد إدنجتون الطريق، فعليك أن تعرف أن النيوترون لم يكن قد أكتشف حتى عام ١٩٣٢، لذلك فإنهم كانوا يسيرون بسرعة مليئة بالأخطار.

وبمجرد أن عرف الجميع بوجود الكثير من الهيدروجين فى الشمس، كان من الطبيعى محاولة استنتاج نسبة الهيدروجين إلى العناصر الأكثر ثقلاً، التى تجعل نجمًا مثل الشمس متزناً. ولسوء الحظ، وهذا يعود إلى المفاضلة بين العوامل المختلفة التى تؤثر على توازن النجم، لم يكن هناك سوى إجابتين عن هذا السؤال. واتضح أن نجمًا له كتلة الشمس وقوة إشعاعها (أو فى الواقع أى نجم مماثل فى التتالى الرئيسى) سيكون متزنًا إذا كان ٩٥ فى المائة من كتلته على الأقل مكونة من الهيدروجين والهليوم معًا. ولكن مثل هذا النجم سيكون أيضًا متزنًا إذا كان يتكون من ٣٥ فى المائة من الهيدروجين و٦٥ فى المائة من العناصر الثقيلة. وقبل نحو عام ١٩٢٨، كان من المعتقد بشكل عام أن الشمس، مثلها مثل الأرض، مصنوعة من عناصر ثقيلة. ولذلك لم يكن من المدهش تمامًا، عندما أتاحت الحسابات لعلماء الفيزياء الفلكية الاختيار بين نموذجين للنجوم، أحدهما يتكون من ٦٥ فى المائة من العناصر الثقيلة والآخر يتكون من أقل من ٥ فى المائة من العناصر الثقيلة، أن يؤيدوا مباشرة وبشكل جماعى النموذج الخاص بنسبة ٦٥ فى المائة من العناصر الثقيلة، وأن يرفضوا البديل باعتباره مجرد مصادفة غير مهمة ناتجة عن طريقة إجراء الحسابات. ولم يبدأ تصحيح هذا الخطأ فى الواقع إلا فى نهاية العقد اللاحق، ولم ينجح تصحيحه إلا فى الخمسينيات رغم أن علماء الفيزياء الفلكية لم يضعوا أيديهم على سر التفاعلات النووية التى تجرى داخل النجوم إلا فى نهاية الثلاثينيات.

ومرة أخرى، يعمل جورج جامو كحافز للتطورات الجديدة. ففى أبريل ١٩٣٨ نظم مؤتمراً فى واشنطن، حيث اجتمع علماء فلك وعلماء فيزياء معًا لمناقشة مشاكل الطاقة التى تتولد داخل النجوم. وكان ما يثير الحيرة كيفية العثور على مجموعة من التفاعلات

النووية، يضاف إليها تركيب أكثر تفصيلاً للنموذج النجمي، يمكنهما إنتاج طاقة بالمعدل المناسب تماماً للمحافظة على نجم مثل الشمس متألقاً باستمرار على صورته الراهنة مليارات السنوات. وكان أتكينسون وآخرون يحاولون منذ عدة سنوات العثور على مجموعة التفاعلات المناسبة، لكن كل ما توصلوا إليه إما أنه كان أسرع مما يجب أو بطيء للغاية. ومثال لذلك، إذا كان هناك الكثير من الليثيوم داخل الشمس، سوف تتحد نوى الهيدروجين مع نوى الليثيوم، حتى عند درجات لا تتجاوز ١٥ مليون درجة، مما ينتج عنه نوى بيريليوم غير متوازنة، وما أسرع ما ينشطر كل منها إلى نواتي هليوم. وقد تحدث تسلسلات تفاعلات تحويل الهيدروجين إلى هليوم بسرعة كبيرة، وتطلق طاقة هائلة في مثل هذا الوقت القصير، بحيث ينفجر النجم إلى شظايا متباعدة. ومن الناحية الأخرى، إذا كان أغلب كتلة النجم تحتوى على نوى أكسجين، رغم أن البروتونات قد تتفاعل مع هذه النوى لإطلاق طاقة، فقد لا تطلق طاقة كافية للمحافظة على سطوع نجم يمثل ما تتألق الشمس الراهنة. وقد يتقلص النجم، مطلقاً طاقة جاذبية وتزداد الحرارة داخله، حتى يصبح على درجة عالية من السخونة لا تجعل هذه العملية (أو أى عملية أخرى) قادرة على إنتاج طاقة كافية للمحافظة على توازن النجم. ولم يستطع أحد في المؤتمر تقديم مجموعة تفاعلات نووية تكون، مثلها مثل عصيدة بيبي بير، "مناسبة بالضبط". لكنهم عادوا إلى أوطانهم بعد ذلك وهم يحملون معهم اللغز الذى يشغل عقولهم. وتوصل أحدهم، وهو هانس بيت، من جامعة كورنيل، إلى حل له.

هناك حكاية مرحة تتعلق بالطريقة التى اكتشف بها بيت حل اللغز، لكن ليس لها، لسوء الحظ، ظل من الحقيقة. وكان جامو من المحبين للمرح وحكى الحكايات، فإذا كانت الحقيقة مثيرة للملل، كان يسعده أن يزوقها قليلاً. لذلك كان معتاداً على قص حكاية ركوب بيت القطار من واشنطن بعد انتهاء اللقاء، وهو مقتنع بأن حل هذا اللغز ليس صعباً إلى هذه الدرجة، وقرر أن تكون مهمته التوصل إلى الحل قبل أن يطلب المضيف من الركاب التوجه لتناول الغداء. وتبعاً للأسطورة التى اخترعها جامو، قرر بيت بينه وبين نفسه، وهو الذى يحب عادة أن يتمتع بوجبته، أن يحل اللغز قبل السماح لنفسه بتناول الطعام، وبعد سباق محموم فى خربشة حسابات بقلم رصاص توصل

إلى الإجابة فى لحظة وصول المضيف نفسها بالضبط لدعوة الركاب إلى الغداء. ولكن تبعاً لاعتراف جامو نفسه فى كتابه "مولد وموت الشمس"، لا يجب أن "نبالغ كثيراً فى تصديق" هذه القصة عن "العلاقة بين شهية الدكتور هانز بيت الشهيرة وحله السريع لمشكلة التفاعل الشمسى".

والواقع أن بيت لم يعثر على حل اللغز بهذه السرعة البالغة، ورغم أنه بدأ العمل على حله وهو فى القطار، فقد انتهى من الحل عندما عاد إلى كورنيل (دون أن تفوته أية وجبة). وما لم يعرفه بيت أن كارل فون ويزساكر، فى ألمانيا، كان قد توصل إلى حل اللغز نفسه، فى وقت مبكر من العام نفسه، لكن بيت يحصل على المكانة الأعلى فى هذا الموضوع، ليس فقط لأن فون ويزساكر لم يجد جامو بجانبه ليروج إنجازه، ولكن أيضاً لأن هناك ما فعله بيت فى صيف ١٩٣٨، وهو ما سأحكيه لك باختصار. تعتبر العملية التى اكتشفها كل منهما فى صميم العمل الريادى لأتكينسون، لأنها تحتوى بالفعل على نوى الهيدروجين (بروتونات) تخترق نوى العناصر الأكثر ثقلاً - خاصة الكربون والنتروجين والأكسجين - عبر عملية متعددة الخطوات تنتهى بطرد جسيم ألفا من النواة. وهذا بالضبط من نوع تأثير قدر الطهى النووى الذى توقعه أتكينسون وهوترمانز قبل ذلك فى ١٩٢٩، ولكنه يأتى الآن وقد استعان بالأرقام الصحيحة التى تم طرحها لتتسق مع معدلات الخطوات المختلفة فى التفاعل. واتضح مع ذلك أن هذه العملية ليست العملية الرئيسية التى تحافظ على الشمس ساطعة، لأنها تكون أكثر فعالية عند درجة حرارة أعلى نسبياً عن درجة الحرارة فى قلب الشمس (أكثر من نحو ٢٠ مليون درجة). ودرجات الحرارة هذه توجد فى قلب النجوم التى يكون لها كتلة تصف على الأقل من كتلة الشمس. لذلك فإن الدورة النووية التى اكتشفها بيت وفون ويزساكر هى العملية التى تحافظ على سطوع النجوم الأعلى من نجوم التتالى الرئيسى. لكن من المهم جداً لوجودنا الخاص، وهو ما حدث فى البداية تاريخياً، أن نكون هنا فى المكان المناسب لحل معضلة سطوع النجوم.

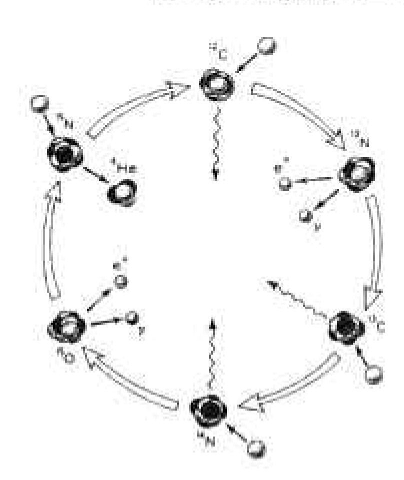
ولأن الدورة تبدأ بالكربون، فإنه يطلق عليها عادة دورة الكربون، ولأن نوى النتروجين والأكسجين تشارك أيضاً فى العملية، فإنه يشار إليها بالتالى إما بدورة الكربون النتروجين CN أو دورة الكربون النتروجين الأكسجين CNO. وتُعرف مساهمة

لهيدروجين فى الدورة ضمنًا وليس هناك ممن أعرفهم من علماء الفلك من يشير إلى هذه الدورة بالأحرف الأولى المختصرة كاملة، لكنها فى الواقع دورة كربون هيدروجين أكسجين نتروجين CHON. وتعتمد العمليات التى تحافظ على كثير من نجوم التتالى الرئيسى ساطعة على وجود العناصر نفسها بالضبط المهمة للحياة التى نعرفها، مما يؤكد على علاقة القرب الشديد بين الحياة والكون.

ويسير الأمر على المنوال التالى. فى البداية لا بد من وجود ولو كمية قليلة متناثرة من العناصر الأكثر ثقلاً داخل النجم، ولم يكن ينظر إلى هذا الأمر فى الثلاثينيات على أنه يمثل مشكلة بالطبع، حيث كان يُعتقد أن ٦٥ فى المائة من النجم تتكون من العناصر الثقيلة. وبالنسبة إلينا الآن فإن ذلك يدلنا على أننا نتعامل مع جيل ثانى (أو لاحق) من النجوم، النجوم التى تكونت من مادة تمت معالجتها، ولو جزئياً، داخل نجوم أخرى. وبالفعل فإن شكل الدورة – وهى تلتف على هيئة حلقة تكرارية – يتيح البدء من أية خطوة فى العملية، ولكن من الطبيعى البدء بالكربون. وفى البداية يشق بروتون نفقًا فى نواة الكربون – ١٢ ، الذى يحتوى بالفعل على ستة بروتونات وستة نيوترونات، مما يحول النواة إلى نتروجين – ١٣ غير مستقر، وهو ذو نشاط إشعاعى، وينبعث منه بوزيترون [٤٢] e^+ ونيوترينو ν، ثم تحول نفسها إلى نواة مستقرة كربون – ١٣ . فإذا شق بروتون آخر نفقًا لنفسه فى نواة الكربون – ١٣ ، فإنه يسبب ظهور نواة أخرى غير مستقرة، هى النتروجين – ١٤ . ولكن إذا دخل بروتون ثالث فى نواة النتروجين – ١٤ فإنه يؤدى إلى ظهور نواة أخرى غير مستقرة هى أكسجين – ١٥، التى تتحلل هى أيضًا بأن ينبعث منها بوزيترون ونيوترينو، وبذلك تحول نفسها إلى نتروجين – ١٥ المستقر. ومع ذلك يمكن أن يحدث عندئذ شىء أكثر إثارة. إذا شق بروتون رابع طريقه إلى نواة النتروجين – ١٥، فإنه يجد ما يعيق تقدمه ويتم فوراً طرد جسيم ألفا تاركًا خلفه نواة كربون – ١٢ مستقرة، مماثلة للنواة التى بدأنا بها.

(٤٢) البوزيترون ذو شحنة موجبة وهو نسخة مطابقة للإلكترون. وعندما يطرد بروتون موجب الشحنة بوزيترون (ونيوترينو)، يصبح عديم الشحنة تماماً ويصير نيوتروناً وهذه العملية (انبعاث بوزيترون) تتعادل بالضبط مع امتصاص إلكترون.

والنتيجة النهائية للدورة (أيًا كانت نقطة بداية للسير عليها) أنه يتم طبخ أربع بروتونات فى القدر النووى للحصول على نواة هليوم واحدة (جسيم ألفا)، مع زوج من البوزيترونات واثنين من النيوترينو، عبر مسار الدورة، وخلال الخطوات المختلفة من الدورة تنتج التفاعلات أيضاً إشعاعاً كهرومغناطيسياً. لكننا لم "نستهلك" أى من النوى الأخرى التى شاركت فى الدورة – فما زال هناك الكربون والنتروجين والأكسجين، ويمكن استخدامها مرة بعد مرة فى كثير من مثل هذه الدورات، بينما يتم الحصول على الأكسجين – ١٥ كلما احتاج الأمر، ليكون مصدراً وافراً للطاقة حتى لو كان ذلك قد تم بمشاركة قليلة نسبية من نوى العناصر الثقيلة.



شكل (٥ – ١) : دورة الكربون النتروجين الأكسجين CNO، التى تعتبر المصدر الرئيسى للطاقة فى النجوم الأكبر بقليل من الشمس. وما يلى من النص يوضح التفاصيل

وتأتى قوة هذا التصور لمصدر طاقة النجوم من أن كل خطوة فى الدورة يمكن دراستها هنا على الأرض. فنحن نعرف، من التجارب، ما يحدث عندما تتفاعل

البروتونات مع كل من النوى المشاركة فى الدورة؛ لذلك نعرف سرعة حدوث التفاعلات فى شروط المختبر، ويمكننا استخدام فيزياء الكم لاستنتاج ذلك لحساب سرعة حدوث الدورات فى الظروف الموجودة داخل النجوم. ولا يتعلق الأمر بنزاع يتم حسمه بمجرد رفع الأيدى للموافقة أو الرفض، بل بحسابات كمية سليمة. وفى الواقع تكون الحسابات بالغة الدقة حتى أنه يصبح من الممكن أن تحتوى على التأثيرات الثانوية التى تؤثر على الدورة. والأكثر أهمية فى هذا الموضوع هو نوع من الحلقة الجانبية، تبدأ خارجة من وصلة النتروجين – ١٥ فى التسلسل. ويحدث أحياناً (خلال نسبة مئوية من الزمن يمكن حسابها بدقة) أنه بدلاً من انبعاث جسيم ألفا بمجرد أن تمتص نواة نتروجين – 15بروتوناً، أن تتحول هذه النواة إلى نواة أكسجين – ١٦ ، التى تمتص بنفسها بروتونًا لتصبح فلورين – ١٧، التى تتحلل عندئذ بطرد بوزيترون ونيوترينو لتصبح أكسجين – ١٧، التى تمتص بنفسها بروتوناً وينبعث منها جسيم ألفا، فتنتج نواة نتروجين – ١٧ – التى تربط هذه الحلقة الجانبية من جديد بالدورة الرئيسية. وهناك انحرافات أخرى، أكثر ندرة، من الحلقة الرئيسية، لم أقدمها بالتفصيل هنا. وأهم ما فى الموضوع أن كل شبكة الحلقات هذه، أيًا كان اتجاه المسار فى أية تسلسلات خاصة للتفاعلات، تكون النتيجة النهائية تحويل أربعة بروتونات إلى نواة هليوم واحدة، وزوج بوزيترون ونيوترينو، وطاقة. أما ما تبقى غير ذلك فإنه لا يتغير.

ومع ذلك هناك ما هو أكثر دقة حول تسلسل شبكة التفاعلات هذه وهو ذو أهمية خاصة بالنسبة لأشكال الحياة مثل حياتنا. لا شىء يتغير، إذا وضعنا فى اعتبارنا أن العملية وصلت إلى التوازن. فكل خطوة فى شبكة التفاعلات تحدث بمعدل مختلف، مما يؤثر على طبيعة التوازن الكلى الناتج. فحيث تحدث التفاعلات بسرعة، لا تستمر النوى الناتجة فى الوجود بكميات كبيرة. ولكن حيث تحدث التفاعلات بسرعة أكثر بطئاً، يكون هناك ما يشبه كبح السرعة، تستمر النوى فى التشكل حتى تصل إلى توازن ما، عندما يصبح عدد النوى الجديدة التى تم تركيبها مساوياً لعدد النوى القديمة التى دُمرت.

افترض أن لديك ثلاثة دلاء، لكل منها ثقب فى قاعه، وكل منها فوق الأخر حيث يصب فيها تيار مستمر من الماء من خلال صنبور. يعتمد معدل سريان الماء خارجاً من الفتحة فى قاع الدلو على كل من مساحة الثقب وكمية الماء الموجودة فى الدلو – فمزيد

من الماء ينتج عنه مزيد من الضغط مما يجعل الماء ينبثق خلال الفتحة بمعدل أسرع. ويمكنك ضبط مساحة الفتحة وسريان الماء من الصنبور للمحافظة على امتلاء الدلو الأول، مثلاً، إلى ربعه بالماء. وينتج عن ذلك سريان ثابت للماء إلى الدلو الثانى، وبجعل فتحته أصغر، يمكنك التأكد من أنه ممتلئ إلى ثلاثة أرباعه دائماً. وأخيراً فإن الماء يتدفق إلى الدلو السفلى، ذو الفتحة الأكبر فى قاعه، ليكون ممتلئ حتى ثمنه فقط. والنتيجة النهائية، سيكون هناك تدفق ثابت من الماء خلال هذه المجموعة من الدلاء، ولكن بالنسبة لكل دلو على حدة يكون هناك توازن. ولو احتفظت بهذا التسلسل للدلاء، إذا أغلقت الصنبور وتركتها لتفريغ ما فيها من ماء، فإنك عندما تعود (إلى نفس المنظومة السابقة بالطبع) فإن مستوى الماء فى الدلاء سوف يعود إلى مستويات التوازن من جديد، لتظل ثابتة. وحتى لو أفرغت لتراً إضافيًا من الماء أو لترين فى أحد الدلاء (فى أى منها أو فيها كلها) أو غرفت بعض الماء من الدلاء، فسوف تستقر من جديد على نفس مستويات التوازن.

وتعمل دورة الكربون بطريقة مشابهة، وتعتبر فى حالة توازن، بدون تغير كلى فى عدد كل نوع من النوى الموجودة، عندما يكون هناك ٥,٥ فى المائة من كربون – ١٢، و٩,٠ فى المائة من كربون – ١٣ ، و٩٣,٦ فى المائة نتروجين – ١٤ ، و٠,٠٠٤ فى المائة نتروجين – ١٥ . ويتم الوصول إلى هذا التوازن مهما كان الخليط الأصلى لهذه العناصر عند بداية دورة الكربون فى نشاطها – حتى لو، إذا اعتبرنا الحالة المتطرفة، لم يكن هناك نتروجين بالمرة لنبدأ به، وهو ما يطابق أن يكون لدينا دلو فارغ. وترتفع نسبة نتروجين – ١٤ بسبب التفاعل الذى يحول نتروجين – ١٤ إلى نتروجين – ١٥ (وهذا الامتصاص للبروتون يطلق عليه "احتراق الهيدروجين") ببطء أكثر من الخطوات الأخرى فى الدورة (دلو نتروجين – ١٤ له فتحة صغيرة فى قاعه). لذلك فأحد النواتج الجانبية لدورة الكربون، خلال عمر النجم فى الطرف الأكثر كثافة من التتالى الرئيسى، أن يحول معظم الكربون والأكسجين اللذين كانا موجودين فى البداية فى النجم، إلى نتروجين [٤٢] . وسوف أوضح مصدر الكربون والأكسجين فى الفصل الثامن. وما أود

(٤٢) يدخل أكسجين – ١٦ – وهو النوع الذى نتنفسه من الهواء، إلى موضوعنا من خلال الحلقات الجانبية، مثل تلك الحلقة التى تحدثت عنها.

التاكيد عليه هنا هو أن دورة الكربون النشيطة داخل النجوم هى التى تنتج النتروجين الذى تعتمد عليه الحياة التى تعرفها. ولا يقتصر الأمر على أن العناصر فى جسمك تم إنتاجها داخل النجوم وتبعثرت فى الفضاء على هيئة انفجارات مذهلة ونوى النتروجين فى جسمك - بشكل خاص - كانت مفيدة فى تحديد معدل حدوث دورة الكربون فى الأجيال السابقة من النجوم. ولا أعنى فقط نوى النتروجين "مثل" تلك الموجودة فى جسمك. بل أعنى أن النوى نفسها التى تمثل الآن جزء من جسمك كانت فى زمن ما المركب السائد فى تفاعلات دورة الكربون النشيطة داخل النجوم. وهناك ارتباط مباشر بين الذرات فى جسمك والطريقة التى تسطع بها النجوم الأضخم من الشمس بمرة ونصف مرة.

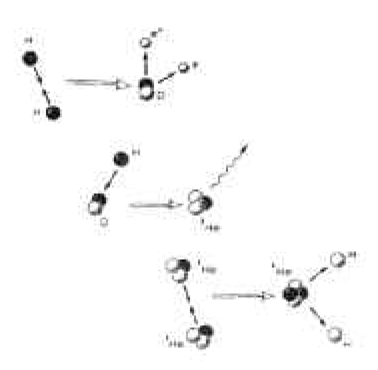
ولكن ليست هذه طريقة سطوع الشمس (على الأقل ليست الطريقة الرئيسية، حيث إن نسبة مئوية صغيرة من حرارة الشمس تأتى من دورة الكربون). ولقد فكر لوت طويلاً وبعمق، بعد عودته إلى كورنيل من مؤتمر واشنطن، فى موضوع توليد الطاقة داخل النجوم. وبجانب جهده المنفرد لاستنتاج تفاصيل دورة الكربون، شارك عالم فيزياء آخر هو تشارلز كريتشفيلد لدراسة ما اكتشفه أتكينسون منذ عدة أعوام خلت، وهو أن أكثر التفاعلات النووية شيوعًا فى داخل نجم مثل الشمس لا بد أنه الاندماج البسيط لبروتونين لإنتاج نواة ديتريوم، مع انبعاث بوزيترون ونيوترينو خلال الاندماج. وقد يثير تسلسل الأحداث هنا بعض الارتباك، لأن البحث الأول الذى قدمه بيت وكريتشفيلد وتعامل مع هذا التفاعل بين بروتون وبروتون كان قيد النشر قبل اكتمال أبحاث بيت حول دورة الكربون ، لكن أبحاث دورة الكربون تمت قبل الانتهاء من بحث التفاعل بين بروتون وبروتون. وأيًا كان الذى تم قبل الآخر، فإن كلا الاكتشافين المهمين ظهرا فى صيف ١٩٣٨، وكانت نتيجة اتساع نطاق مساهمة بيت فى حل لغز كيفية تولد الطاقة داخل النجوم أن مساهمته هذه كانت أكثر أهمية بكثير من مساهمة ويزساكر.

ويطلق على عملية توليد الطاقة التى بحثها بيت وكريتشفيلد، لأسباب معقولة، سلسلة بروتون - بروتون (أو سلسلة pp) . وبطريقة أو بأخرى تحول هذه العملية أربع بروتونات إلى نواة هيليوم - ٤ (مع الانبعاث العادى للبوزيترونات والنيوترونات

والإشعاع الكهرومغناطيسى على هيئة أشعة جاما)، وكما هو الأمر بالنسبة لدورة الكربون، فإن هذه السلسلة قريبة من التفاعلات التى تتم دراستها فى المختبرات ومسرعات الجسيمات هنا على الأرض، والتى تم قياس معدلاتها.

يعتبر تسلسل بروتون - بروتون أكثر قابلية للفهم مقارنة بدورة الكربون، فإذا عرفنا إنه لم يتم التفكير فيها أولاً بشكل واضح، لاتضح لنا إلى أى مدى كان خيال علماء الفيزياء الفلكية معاقًا فى الثلاثينيات باقتناعهم الراسخ بأن العناصر الثقيلة هى التى تهيمن على تركيب النجوم. وكما سبق أن أوضحت، فإن الخطوة الأولى فى التسلسل تحدث عندما يتقابل بروتونان لتشكيل نواة ديتريوم، التى تحتوى على بروتون واحد ونيوترون واحد. وكما هى العادة، يتكون النيوترينو بواسطة بروتون ينبعث عنه بوزيترون ونيوترينو. وعندما يدخل بروتون آخر إلى النواة، فإنها تصبح نواة هليوم - ٣ (بروتونان زائد نيوترون واحد). وفى النهاية، عندما تتفاعل نواتا هليوم - ٣ مع بعضهما، يتم انبعاث بروتونان، تاركين خلفهما نواة هليوم - ٤ مستقرة (بروتونان زائد نيوترونان). ونقول مرة أخرى، إن النتيجة النهائية هى أنه تم تحويل أربعة بروتونات إلى نواة هليوم - ٤ واحدة، مع بوزيترونين واثنين نيوترينو وبعض أشعة جاما التى تنبعث كمنتج جانبى (ويشترك عمليًا ستة بروتونات فى التسلسل، لكن يبقى منها اثنين فى نهاية التسلسل).

وكما هو الحال مع دورة الكربون، هناك أمور دقيقة لا نحتاج إلى أن نُقلق أنفسنا بها كثيراً. يحدث التفاعل بين نواتى هليوم -٣ لإنتاج نواة هليوم - ٤ واحدة وانبعاث بروتونان، خلال نحو ٨٦ فى المائة من وقت التسلسل تحت الشروط الموجودة داخل الشمس. وبسبب وجود بقايا من النوى الخفيفة الأخرى داخل الشمس (وبشكل خاص هليوم - ٧)، فإن هليوم - ٣ يشارك خلال ١٤ فى المائة من الوقت فى التفاعلات الأخرى، التسلسلات الجانبية التى يكون لها أيضًا الأثر النهائى فى تحويل هليوم - ٣ إلى هليوم - ٤ - ومع ذلك فإن أهم ما فى الموضوع أن هذه التفاعلات قابلة للفهم، وأن مجموعة التفاعلات كلها تصف بشكل دقيق كيف تحصل نجوم مثل الشمس، عند طرف الكتل الأصغر على التتالى الرئيسى، على طاقتها، بأن "تحرق" وقودها النووى عند درجة حرارة تصل إلى نحو ١٥ مليون درجة.



شكل (٤ - ٢) : تسلسل بروتون - بروتون، وهو المصدر الرئيسى للطاقة فى الشمس والنجوم الأصغر كتلة نسبيًا. انظر النص لمزيد من التفاصيل.

ويتيح الفهم الحديث لكيفية عمل قوى الطبيعة تبصراً دقيقًا فيما يخص عمر نجوم مثل الشمس. وبسبب انبعاث البوزوترونات والنيوترينوات، فإن أول خطوة فى تسلسل بروتون - بروتون، عندما يندمج بروتونان معًا لإنتاج نواة ديتريوم، تحدث بمعدل يعتمد على قوة ما يُطلق عليه القوى النووية الضعيفة. وتلك القوة هى التى تتحكم فى نوع عملية التحلل، حيث يتحول بروتون إلى نيوترون بانبعاث الجسيمين الآخرين. ولأن القوة الضعيفة بالغة الضعف، فإن هذا التفاعل بين بروتونين نادر تمامًا، وتضاف إلى ذلك الصعوبات المصاحبة لعملية عبور النفق (٤٤) . ولا تتضمن الخطوات الأخرى فى هذا التسلسل (وهذا يختلف عن خطوات كثيرة فى دورة الكربون) القوة الضعيفة، فقط القوة النووية الشديدة والقوة الكهرومغناطيسية، لذلك فإنها تحدث بسرعة أعلى بكثير.

(٤٤) وكان ذلك فى الواقع موضوعًا فى الاعتبار عندما أوضحت مدى قلة التصادمات بين البروتونات فى عملية الاندماج.

وبمجرد إنتاج الديتريوم، يكون التقدم سهلاً دون معوقات، وتستمر نجوم مثل الشمس فى الوجود زمنًا طويلاً لأن الخطوة الأولى فى التسلسل مجرد عنق زجاجة (الفتحة فى الدلو الأول ضيقة جدًا). وأحد توابع ذلك أن أى ديتريوم كان موجوداً عند مولد النجم يتم تدميره بسبب نشاط تسلسل بروتون - بروتون (فهناك فتحة كبيرة فى دلو الديتريوم). وبشكل عام فإن الديتريوم لا يتم إنتاجه داخل النجوم، لكن يتم تدميره هناك. وهذا يرفع من درجة الإثارة فى لغز المصدر الأساسى لهذا الديتريوم الذى نرصده (بمقياس الطيف) فى أغلفة النجوم القديمة. حقا من أين أتى أصلاً الهليوم، الذى نعرفه حاليًا، ويشارك بنسبة ٢٥ فى المائة من كتل النجوم القديمة؟ والهيدروجين نفسه؟ وقبل الشروع فى توضيح مصدر كل العناصر الثقيلة، فإن الوقت حان لعمل انعطافة عن حكاية طبيعة نشاط النجوم فى الوقت الراهن، لتوضيح مصدر المادة التى تشكلت منها النجوم الأولى - وهذه الانعطافة تعود بنا إلى ١٥ مليار سنة فى الزمن إلى الانفجار العظيم عندما ولد الكون الذى نعرفه.

الفصل السادس

مطبخ الانفجار العظيم

ليس تاريخ العلم بالإحكام والمنهجية دائمًا كما قد تصفه بعض الكتب التى نقرأها. والاكتشافات الناتجة عن التبصرات الفذة المتتابعة التى قد تسارع بتطور المفاهيم قد لا تظهر لعدة سنوات، بينما يحدث فى مناسبات أخرى ألا تصبح صلة الاكتشاف العلمى بالموضوع قيد البحث واضحة إلا بعد وقت طويل من ظهوره. وكان التطور الموازى، بعد ١٩٣٠ تقريبًا، فى مجال فهم طبيعة نشاط النجوم وكيفية صيرورة الكون إلى ما هو عليه الآن، يتسم بالفوضى والارتباك جزئيًا، ورغم اعتماد التطورين على التقنية الجديدة فى تحسين التلسكوبات والنظرية الكمية فى الفيزياء الجديدة (ومن هنا حدوثهما بشكل متوازى)، فقد احتاج الأمر إلى أربعين سنة لتجميع كل الأجزاء لكى تتسق معًا وتعطى صورة متماسكة ذاتيًا توضح كيفية تطور النجوم داخل كون متمدد، ومصدر المادة التى تشكلنا منها. ولنضع فى اعتبارنا أن علماء الفلك لم يكونوا حتى قد بدأوا فى التحقق من أن النجوم مصنوعة من مادة الأرض نفسها، وأن تركيبهما يهيمن عليه الهيدروجين، إلا فى نهاية العشرينيات. وفى الوقت نفسه تقريبًا عمل إدوين هابل وزميله ملتون هوماسون على أكبر وأفضل تلسكوب كان متاحًا حينئذ على الأرض، ألا وهو التلسكوب العاكس هوكر ١٠٠ بوصة (٢,٥ متر) فى مونت ولسون فى كاليفورنيا، واكتشفا أن الكون يتمدد. وكان هذا الاكتشاف وراء التوصل إلى أن الكون نشأ من انفجار عظيم، حدث منذ نحو ١٥ مليار سنة، وأن نواتج الانفجار العظيم التى شكلت أول جيل من النجوم كانت عبارة عن مزيج يتكون بشكل تقريبى من نسبة ٧٥ فى المائة هيدروجين ونسبة ٢٥ فى المائة هليوم، وعدد قليل متناثر

من العناصر الخفيفة الأخرى (من ضمنها، وهذا أمر حاسم، الديوتريوم). لكن ذلك لم يصبح واضحًا إلى فى نهاية الستينيات، بعد حدوث تطورات مهمة فى فهمنا لكيفية إنتاج العناصر الأكثر ثقلاً داخل النجوم. وتأتى هذه التطورات فى الفصل اللاحق، ولأن الهيدروجين والهليوم، اللذين تكونت منهما النجوم الأولى بكل تأكيد، ظهرا فى البداية مع الانفجار العظيم، فمن المقبول أن نبدأ بشرح هذه العملية، رغم أنه لم يتم فهمها تمامًا إلا بعد اكتمال نظرية نشاط النجوم.

ولقد كتبت عن الانفجار العظيم من قبل [٤٥] ، ولا أزمع الدخول فى تفاصيل واسعة حوله هنا. لكنى أرغب فى التأكيد على أنه علم حقيقى، متفق عليه بشكل كامل، وتم اختباره بمقارنة النظرية بالملاحظات. وهناك شك ضئيل فى أن الكون الذى نعرفه ظهر نتيجة حالة بالغة السخونة بالغة الكثافة – الانفجار العظيم – منذ نحو (وربما أقل من ذلك بقليل) ١٥ مليار سنة. وهناك بعض المناقشات حول كيفية وصوله إلى هذه الحالة، وعلى وجه الدقة الزمن الذى مضى منذ حدوث هذا الانفجار العظيم، وأيضًا حول المصير النهائى للكون. لكن هذه المجادلات خارج إطار كتابنا هذا.

بدأ "اكتشاف" الانفجار العظيم عندما استخدم هابل التلسكوب ١٠٠ بوصة لقياس مدى بعد المجرات الأبعد من مجرة درب التبّانة. وتوصل هابل – بشكل نهائى – إلى أن نقط الضوء الغائمة التى نراها بأجهزة التلسكوب هى فعلاً مجرات أخرى، ومجرة درب التبّانة نفسها عبارة عن جزيرة من النجوم فى الفضاء، على هيئة قرص، البعد بين طرفيه نحو ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية ويحتوى على نحو ٢٠٠ مليار نجم. واتضح أنها تقريبًا مجرة متوسطة بالنسبة لنوعها (رغم أن ذلك لم يُعرف بشكل دقيق إلا فى التسعينيات). وتعتبر المجرات الأخرى، التى توصف بأنها أهليلجية بسبب شكلها، أكبر بكثير، فى معظم الحالات، من مجرة درب التبّانة، والأخرى المعروفة بالمجرات القزمية أصغر بكثير. وتصل التقديرات التقريبية إلى أن عدة مئات المليارات من المجرات يمكن رؤيتها، من حيث المبدأ، بواسطة التلسكوبات لدينا. وكان قياس المسافة بيننا وبين أكثر المجرات قربًا إنجازًا ضخمًا بتقنيات العشرينيات، وتأسس هذا القياس على استخدام

(٤٥) وبشكل خاص انظر الكتابين اللذين كتبتهما "بحثًا عن الانفجار العظيم" و"مولد الزمان".

نجوم قيفاوس [٤٦] المتغيرة كمؤشرات مسافة، أو "شموع قياسية". لكن حكاية الانفجار العظيم لم تبدأ إلى بالخطوة التالية، التى خطاها هابل (الذى قاس المسافات) بالتعاون مع هوماسون (الذى قاس الإزاحات الحمراء) [٤٧].

وبقياس الإزاحات الحمراء فى الضوء الآتى من المجرات الأخرى نعرف أنها تتحرك مبتعدة. وتلك القياسات صعبة جداً لأنه رغم احتواء كل مجرة على مئات المليارات من النجوم، فإنها على درجة من البعد تجعلها أكثر خفوتاً، عندما نراها من الأرض، مقارنة بالنجوم المفردة التى نراها فى مجرتنا. لكن هابل وهوماسون لم يكتشفا فقط أن كل مجرة رصداها، فيما عدا اثنين أو ثلاثة من أقرب جيران مجرة الطريق اللبنى، ظهر فى ضوئها إزاحة حمراء، لكنهما اكتشفا أيضًا أن الإزاحة الحمراء تتناسب مع بُعد المجرة عنا. وبتعبير آخر، فإن السرعة ابتعاد المجرة عنا كما تبدو تتناسب مع بُعدها عنا. ولا يعنى ذلك أننا فى مركز الكون. ويعتبر هذا النوع من العلاقة (الإزاحة الحمراء – المسافة) إضافة إلى التناسب بين السرعة والمسافة، هو القانون الوحيد للإزاحة الحمراء – المسافة (إلا فى الحالة غير ذات الأهمية عندما لا تكون أى مجرة فى حالة حركة) وهو قانون يسرى دائمًا أيًا كانت المجرة التى ترصد الأحداث منها. إنه بالتأكيد قانون كونى. كل شىء يتباعد عن كل شىء آخر، بالطريقة نفسها بالضبط، فى الكون المتمدد. ولكن لماذا؟

بمجرد أن توصل هابل وهوماسون إلى اكتشافهما، تأكد أن الوسائل الرياضية لصياغة ما توصلا إليه موجودة بالفعل. فإذا عدنا إلى ١٩١٧، تمامًا بعد استكمال ألبرت إنشتاين نظريته حول النسبية العامة (التى تصيغ العلاقة بين المكان والزمان والمادة)، كان قد استعمل المعادلات التى اكتشفها لمحاولة وصف الكون على المقياس الكبير – المكان والزمان والمادة معًا. وارتبك أمام اكتشافه أن المعادلات تتطلب إما أن

(٤٦) قيفاوس cepheus : إحدى كوكبات نصف الكرة الشمالى ويصل قيفاوس بأجزائه الجنوبية إلى داخل الطريق اللبنى (المترجم).

(٤٧) الإزاحة الحمراء redshift : هى إزاحة خطوط الامتصاص والانبعاث فى طيف الأجرام السماوية فى اتجاه الموجات الطويلة، أى النطاق الأحمر من الطيف وتحدث الإزاحة نتيجة ظاهرة دوبلر (المترجم).

يكون المكان فى حالة تمدد أو فى حالة تقلص، لكنها لا تسمح بوجود كون سكونى (استاتيكى). وفى العشرينيات شغل قلة من علماء الرياضيات وعلماء الفلك أنفسهم بغير طائل بهذه المعادلات، دون إدراك أنها تصف الكون الذى نعيش فيه. ولكن عندما اكتشف هابل وهوماسون قانون الإزاحة الحمراء - المسافة (وهو المعروف حالياً بقانون هابل، مما يمثل نوعاً من الظلم بالنسبة لهوماسون)، أصبح من الواضح أن الرياضيات المطلوبة لوصف ما يحدث موجودة بالفعل.

وفى الثلاثينيات استخدم عالم الفلك البلجيكى جورج لاميتر كلا من ملاحظات الرصد والنظرية لاستنتاج أول نسخة مما نسميه اليوم نموذج الانفجار العظيم للكون. واستخدم ما أطلق عليه "الذرة البدائية" (أو ما يطلق عليه أحياناً "البيضة البدائية")، التى تحتوى على كل كتلة المجرات فى الكون المرئى، محصورة وحدها فى المكان حيث انفجرت فجأة متباعدة عن بعضها فى انفجار، مما يماثل انشطار نواة عملاقة ذات نشاط إشعاعى. وشجع هذا التصور الآخرين على تبنى مفهوم الانفجار العظيم ، لكنه من أحد جوانبه يعتبر مفهوماً مضللاً، حيث إن ما تقوله معادلات أينشتاين أن المكان نفسه يتمدد. لم يكن الانفجار العظيم انفجاراً يوجِد المكان فى فضاء خال، ويملأه بشظايا ناتجة عن انفجار (المجرات) تتناثر متباعدة فى الفضاء مثل شظايا قنبلة من طاقة منفجرة. وما يحدث - بالأحرى - أن المكان نفسه يتمدد، ويحمل المجرات معه. ويشبه الأمر قطعة مطاط، عندما تضع فوقها عدة نقاط من الحبر. فعندما تجذب طرفى المطاط لتباعد بينهما، فإن المطاط يتمدد وتتباعد النقاط عن بعضها البعض - لكنها لا تتحرك فوق المطاط.

لذلك من الصعب إعطاء تصور ما، وما تقوله لنا نظرية النسبية العامة إن المكان والزمان ظهرا معاً، ومعهما المادة، ضمن توابع الانفجار العظيم، وأن تلك الفقاعة من المكان - الزمان المليئة بالمادة والطاقة (وهو ما تقوله المعادلة ط = ك س٢ نفسها) قد واصلت التمدد منذ ذلك الحين. والمجرات التى تملأ الكون فى الوقت الراهن، والمادة التى تحتوى عليها كانت تملأ الكون دائماً، رغم أنه كان من الواضح أن قطع المادة كانت أقرب إلى بعضها البعض عندما كان الكون أصغر مما هو عليه اليوم. وحيث إن الإزاحة الحمراء الكونية ليست ناتجة عن حركة المجرات فى المكان، لكنها ناتجة عن

المكان نفسه الذى يتمدد ما بين المجرات، فمن المؤكد أنها ليست ظاهرة دبلر، ولا تقيس السرعة بالطبع، لكنها نوع من السرعة الزائفة. ورغم ذلك فإنه لأسباب تاريخية بشكل جزئى، ولدواعى الملائمة جزئياً، ظل علماء الفلك يشيرون إلى "سرعات تراجع" المجرات البعيدة، رغم عدم وجود عالم فلك كفؤ البتة يصف الإزاحة الحمراء الكونية بأنها ظاهرة دبلر.

وإذا تجاوزنا السؤال حول ما حدث بالضبط فى البداية المبكرة، عندما كان المكان صغيراً إلى أبعد الحدود وكان الزمن يكاد أن يبدأ، فإننا لا نحتاج فيما يخص أغراض هذا الكتاب سوى الاهتمام بالأحوال التى يمكن فهمها تماماً والتى تمت ملاحظتها بشكل جيد عن طريق التجارب. وأقصى ما يمكننا سبره فى مجال كثافة المادة فى الوقت الراهن وما نفهمه بشكل جيد هو كثافة النواة الذرية. ويقول بعض علماء فيزياء الجسيمات إنهم يفهمون ما يحدث داخل النوى، على مستوى الكواركات، لكن لا أحد ينكر أن النوى، والتفاعل بين البروتونات والنيوترونات والإلكترونات، مفهومة بشكل جيد لكنها قد تكون مضجرة عادة بالنسبة لعالم فيزياء محترف، فهل نتوقع منها أن تكون جذابة بالنسبة للشخص العادى. وباستخدام معادلات النسبية العامة، يضاف إليه ملاحظات الرصد الخاصة بمعدل تمدد الكون فى وقتنا الراهن، يمكننا أن نواصل رحلتنا أفضل من الاستعانة بليميتر، الذى يلوى أفكارنا حول التمدد ونستنتج أن كثافة ما نراه اليوم على أنه الكون المرئى كله، كانت مماثلة لكثافة نواة ذرية فى عصرنا الراهن. واتضح أن الإجابة موجودة فى جزء من مائة ألف من الثانية بعد "البداية". ويمكن لقوانين الفيزياء المعروفة، والمفهومة تماماً، أن تصف - من ناحية المبادئ الأساسية - كل شىء حدث بعد ذلك. والجدل الذى أشرت إليه يدور حول ما وقع لكى يحدث الانفجار العظيم، ويتعلق بهذا الجزء من المائة ألف من الثانية، لكن ما أنوى تقديمه لك حول الانفجار العظيم وإنتاج العنصر البدائى يتعلق بالزمن بعد ذلك، حيث كل شىء مفهوم تماماً.

وأول من فكر فعلاً فى فكرة أن العناصر الثقيلة قد تكون ناتجة عن الهيدروجين فى الانفجار العظيم (لم يكن هذا المصطلح مستخدماً فى ذلك الحين، لكنى سأستخدمه نظراً إلى أنه ملائم ويتسق مع الموضوع) هو كارل فون ويزساكر، فى عام ١٩٢٧

مما يثير الفضول، قبل أن يتوصل هو (وبيت) إلى كيفية تحول الهيدروجين إلى هليوم داخل النجوم! وليس هناك مع ذلك ما يثير الدهشة حقًا، حيث إنه فى ذلك الزمن كانت الفكرة المقبولة أن النجوم مكونة أساساً من العناصر الثقيلة، ولا بد أن العناصر الثقيلة قد أتت من مصدر ما. وتحدث فون ويزساكر عن "طبخ" العناصر الثقيلة من الهيدروجين فى الكون المبكر، مقلداً مثال قدر الطبخ لأتكينسون عن العمليات النجمية. لكنه تخيل أن ذلك قد حدث أيضاً خلال الطور المستقر للكون، حيث تم إنجاز الطبخ عند درجة حرارة مناسبة قبل بدء التمدد. وكان هذا القول متناقض مع معادلات نظرية النسبية العامة، تماماً مثل فكرة أن الكون يجب أن يكون فى مثل حالة السكون هذه فى الوقت الحالى.

وكان أول شخص يحاول أن يعالج الحسابات الكمية حول ما يمكن أن تكون عليه الأحوال فى سحابة الغبار البدائية المتمددة هو صديقنا الذى قدمناه سابقًا جورج جامو، فى منتصف الأربعينيات. وفى ذلك الحين كان العلماء قد بدأوا يدركون أن تركيب النجوم كان يهيمن عليه الهيدروجين (والهليوم)، لكنهم كانوا مازالوا مشغولين بمصدر العناصر الأكثر ثقلاً. وتابع جامو فكرة فون ويزساكر حول أن هذه العناصر نتجت خلال الانفجار العظيم، لكنه أنجز عمله مباشرة بناء على الإطار المسموح به فى نظرية النسبية العامة، أفضل نظرية لدينا عن المكان والزمان والمادة. واستخدم مهارته وفهمه للتفاعلات النووية التى من المحتمل أنها حدثت فى الانفجار العظيم. وتوصل إلى أن الأمر لم يكن بالسهولة التى تمناها لإنتاج العناصر فى الانفجار العظيم. وما يظهر فى البداية من نوع الأحوال التى شرحتها تواً عبارة عن بحر من البروتونات والإلكترونات. وعندما كانت مادة الكون لا تزال بالغة الكثافة والسخونة، اضطرت بعض الإلكترونات إن تتحد مع البروتونات لإنتاج النيوترونات، وانضمت بعض النيوترونات والبروتونات إلى بعضها البعض، خلال سلسلة من التفاعلات النووية، لإنتاج نوى الهليوم. ولقد تكوَّن الديوتريوم، بالمناسبة، فى الانفجار العظيم، كخطوة وسطية فى هذه العملية. ولكن بمجرد أن أصبح الأمر مثيراً للاهتمام حقًا، بردت سحابة الغبار المتمددة إلى درجة توقف تفاعلات الاندماج النووى. ولقد عثر جامو على طريقة جيدة لإنتاج الهيدروجين والهليوم، لكنه فشل فى محاولة تفسير مصدر كل الأشياء الأخرى. وعلى

أية حال، فإنه كان شجاعاً. وعندما أصبح واضحاً فى الخمسينيات أن النجوم تتكون تقريبًا من ٩٩ فى المائة من الهيدروجين والهليوم، مع ١ فى المائة فقط من العناصر الثقيلة، كانت من عادة جامو المتحمس أن يقول لزملائه مبتهجاً إنه فسر مصدر ٩٩ فى المائة من مادة النجوم، وأنه سعيد بأن يترك للآخرين الاهتمام بواحد فى المائة من هذه المادة.

ولقد قدّمَ جامو أيضًا، خلال دراسته للانفجار العظيم، بمساعدة زميلين له، أحد أكثر التنبؤات شهرة فى العلم، رغم عدم إدراك كل أهمية هذا التنبؤ لمدة ٢٠ عام تقريباً. من الخطوات المهمة فى استنتاج ما حدث فى الانفجار العظيم تحديد درجات الحرارة التى كانت موجودة. وبالجمع بين ملاحظات الرصد لمعدل تمدد الكون، ونظرية النسبية العامة والفيزياء النووية لإنتاج الهليوم من الهيدروجين، لم يكتف جامو والفيله رالف ألفير بحساب درجة حرارة سحابة الغبار المتوهجة، لكنهما استنتجا أيضاً أن حرارة الإشعاع الناجمة عن الانفجار العظيم لا بد أنها مازالت تملأ الكون فى وقتنا الراهن. وقد تكون باردة جداً، لأن الكون تمدد إلى درجة كبيرة، لكنها قد تكون حالياً ماثلة لبحر من الموجات الدقيقة [٤٨] (مثل الإشعاع فى فرن المايكروويف، لكنها أكثر برودة)، يملأ الكون، وتصل درجة حرارتها إلى عدة درجات فوق الصفر المطلق (والصفر المطلق هو صفر كلفن، وهو -٢٧٣° مئوية).

وعندما جاء الوقت لكتابة بحث علمى حول هذا الإنجاز، قرر جامو أن الأمر قد يبدو مزحة ثقيلة إذا أضاف اسم صديقه القديم هانز بيت كمشارك له فى البحث، لذلك أشار إلى أنه بحث "ألفير، بيت، جامو"، مقلداً الأحرف الإغريقية الأولى (ألفا، بيتا، جاما). ورغم أن بيت لم يساهم البتة فى هذا العمل، تم نشر البحث فى حينه وعليه اسمه. ولقد تضاعف سرور جامو؛ لأن تاريخ النشر الرسمى للصحيفة التى نُشر فيها البحث، وكانت مجرد صدفة، كان الأول من إبريل ١٩٤٨، ومازال يُشار فعلاً إلى البحث على أنه "بحث ألفا، بيتا، جاما".

(٤٨) الموجة الدقيقة microwave : موجة كهرومغناطيسية عالية التردد طولها ملليمتر واحد إلى متر، متوسطة بين الأشعة فوق الحمراء وموجات الراديو القصيرة، وتسمى أيضاً مايكروويف (المترجم).

وتحسنت الحسابات عن طريق تلميذ آخر لجامو، هو روبرت هرمان، ونشر ألفير وهيرمان بحثًا آخر، فى ١٩٤٨ أيضًا، يتضمن تنبؤًا أكثر دقة حول أن الكون ملئ ببحر من إشعاع الخلفية الميكروويفى، وأن درجة حرارته نحو ٥ كلفن. لكنهما كانا يسبقان عصرهما، فلم يتعامل أحد مع هذه الحسابات بالجدية اللازمة لكى يتقصى أمر هذا الإشعاع، ولم يحدث تقدم فعلى فى نظرية ما حدث فى الانفجار العظيم حتى أتت الستينيات. وما حدث فى الواقع فى الخمسينيات أنه كان هناك جدال بين مدرستين فى الفلك حول ما إذا كان هناك بالفعل انفجار عظيم أم لا.

وحث الجدال ثلاثة باحثين، هيرمان بوندى وتومى جولد وفريد هويل، حيث قالوا إن تمدد الكون المرئى يمكن تفسيره أيضًا، إذا استبدلنا فكرة أن كل شىء "خُلق" مجتمعًا فى الانفجار الأعظم، بأنه كانت هناك عملية "خلق مستمر"، مع وجود ذرات جديدة (محتمل أن تكون هيدروجين) ظهرت من لا شىء بالمرة فى الأماكن المفتوحة الواسعة بين المجرات عندما كانت المجرات فى حالة تباعد. وأن هذه الذرات الجديدة تلاقت بالصدفة لتكوين مجرات جديدة، حتى يظهر الكون كله دائمًا بالمظهر نفسه، رغم أن المجرات المرئية فى أى عصر تتباعد عن بعضها البعض. وليست هذه الفكرة بالحمق الذى توصف به فى وقتنا الراهن - فإذا كانت الإجهادات فى المكان - الزمان يمكنها أن "تخلق" [٤٩] كتلة الكون ذات مرة، فلماذا لا يمكن لإجهاد مماثل، ولو كان أصغر، فى المكان - الزمان المصاحب لكون فى حالة تمدد مستقر أن يخلق ذرات ذات مرة أيضًا؟

ومثله مثل كل الأفكار العلمية الجيدة، كان نموذج الحالة المستقرة، كما أصبح يُطلق عليه، قابل للاختبار. وكان يتنبأ بضرورة أن تبدو طريقة تمدد الكون هى نفسها بالضبط بالنسبة لكل مجرة بعيدة كما هو الحال بالنسبة للمجرات القريبة. ويتضمن نموذج الانفجار الأعظم - بالطبع - إن الكون يتغير كلما تقدم به العمر. وحيث إننا نرى المجرات البعيدة عن طريق الضوء (أو أى إشعاع آخر) الذى رحل عنها منذ زمن

(٤٩) لا يتضمن استخدام علماء الفلك لمصطلح "تخلق" وجود خالق، وهو ما يماثل أن يستخدموا مصطلح "تلد" ليتضمن وجود أم، وكلاهما مجرد مصطلح مناسب للاستخدام عند الإشارة إلى بداية الكون.

قديم، عندما كان الكون أكثر شبابًا (وفى بعض الحالات يستغرق الضوء عدة مليارات من السنوات فى رحلته)، فإن تقدم الكون فى العمر يظهر إذا قارنا المجرات القريبة بتلك البعيدة جداً. وكانت هناك جهود جبارة فى مجال ملاحظات الرصد لاختبار مدى صحة الأفكار المتنافسة فى الخمسينيات وبداية الستينيات، خاصة تلك التى قام بها علماء الفلك الراديوى، الذين يملكون فى الوقت الراهن تقنية السبر الأكثر عمقًا الكون مقارنة بما كان لدى نظرائهم فى مجال علم الفلك البصرى. ولديهم أيضًا الحافز لإنجاز ذلك - ولقد كان هناك سوء تفاهم بين هويل وعلماء الفلك الراديوى فى كمبردج، حيث كان يعمل هويل، مما دفع علماء الفلك الراديوى لمحاولة بذل كل ما لديهم لإثبات خطأ نموذج هويل. وكان سوء الفهم متبادل. ورغم أن هويل هو الذى صك فى الواقع مصطلح "الانفجار الأعظم" بمفهومه الفلكى، كان ألطف ما قاله فى أى وقت، خلال إذاعة بى بى سى، فى ١٩٥٠، عن النموذج إنه غير معقول.

وسيان كان النموذج معقولاً أم غير معقول، فإن النتائج النهائية لاختبارات الرصد كانت نصراً حاسمًا لنموذج الكون المتطور. ولكن بمرور الوقت اكتمل الحكم، حيث بدأت ترد بالفعل دلائل فرضت نفسها فى صالح الانفجار العظيم: من الاكتشاف الذى تم بالصدفة البحتة لإشعاع الخلفية الكونى الذى تنبأ به جامو وزملاؤه منذ الأربعينيات. وتم الاكتشاف بواسطة باحثين شابين، أرنو بنزياس وروبرت ولسون، اللذان كانا يعملان على هوائى راديوى يخص مختبرات بيل وكان مصممًا للأبحاث التجريبية التى تجرى على الأقمار الصناعية التجارية. وقبل أن يستطيعا استعمال الجهاز لأبحاث الفلك الراديوى، كان على بنزياس وولسون التأكد من أنهما عرفا كل نقاط الضعف فى الجهاز، ومعايرته برصد مصادر إشعاع معروفة، ووجهاه أيضًا إلى الفضاء الخالى، ما بين مصادر الإشعاع المعروفة، التأكد من نقطة الصفر الخاصة بالجهاز. ولخيبة أملهما وجدا إن الجهاز مصاب بضوضاء راديوى مستمر، يماثل التشوش الذى نسمعه عندما يكون استقبال الإرسال الإذاعى غير مضبوط على محطة ما. وقد بدت هذه الضوضاء آتية من كل الاتجاهات فى الفضاء، واعتبرا ذلك خطأ فى هوائى الجهاز أو نظام التكبير فيه. فإما أن يكون الأمر كذلك، أو أن الكون ملىء

بإشعاع ميكروويفي درجة حرارته بضع درجات كلفن - وهي فكرة رفضاها باعتبارها فكرة سخيفة.

وما لم يكن يعرفه فريق بيل الذي يبعد ٥٠ كم فقط عن قاعدتهم في هولمديل في نيوجيرسي، أن فريقًا من علماء الفلك في جامعة برينستون يترأسه جيم بيبليس، كان يقيم مسبارًا متخصصًا تم تصميمه لرصد إشعاع الخلفية الكونية. ولم يكن السبب أبحاث جامو وزملائه، التي طواها النسيان منذ زمن بعيد، ولكن لأن بيبليس قد أنجز الحسابات نفسها من الناحية الأساسية، بشكل مستقل عن الأبحاث المبكرة. وفي ديسمبر ١٩٦٤، ذكر بينزياس المشكلة التي واجهته مع ولسون تجاه الضوضاء الشديدة في التلسكوب الراديوي الذي كانا يستعملانه، لزميل له في معهد ماساشوسيتس للتقنية. وفي يناير ١٩٦٥ اتصل هذا الزميل ببينزياس هاتفيًا، وقال له إنه سمع منذ قليل عن حديث لبيبليس صرح خلاله بأنه لا بد أن الكون مليء ببحر من الإشعاع الميكروويفي عند درجة حرارة أقل من ١٠ كلفن. واجتمع الفريقان فورًا، وأكد بيبليس أن بينزياس وولسون اكتشفا الإشعاع الذي كان يوشك أن يبحث عنه مع فريقه.

وعندما تم الإعلان عن الاكتشاف بشكل رسمي، من خلال بحثين نشرا في ١٩٦٥ (أحدهما لبينزياس وولسون والآخر لفريق برينسيتون)، بدأ الجميع ينظرون نظرة جادة لفكرة وجود انفجار عظيم بالفعل. ومن قبل ذلك كان علم الفلك يشبه تقريبًا مباراة فكرية، موضوع يعالجه علماء الرياضيات بمعادلات نظرية النسبية العامة، ولا يشبه البتة موضوعًا حقيقيًا مثل النجوم، التي يمكننا رؤيتها بالعين المجردة. وكانت حمى المجادلات في علم الفلك تستمد حرارتها من المناقشات النابعة من التنافسات أو الأحقاد الشخصية، مثل إثبات أن هويل على خطأ مما دفع علماء الفلك الراديوي في كمبردج لقياس خواص كل المجرات الراديوية البعيدة بأقصى دقة ممكنة.

وبالفعل، فإنه حتى في ١٩٦٥، وكانت لدي الفرصة، بصفتي لم أتخرج بعد من جامعة سوسيكس، لمناقشة آفاق تطوري المهني مع هيرمان بوندي نفسه، أن نصحني بالتخلي عن أي تفكير في العمل في علم الفلك (وكان طموحي الوحيد حينئذ)، لأنه قد يكون طريقًا مهنيًا مسدودًا. لكن الأحداث تجاوزت نصيحته. فلقد أدى اكتشاف إشعاع

الخلفية الكوني بعد وقت قصير إلى بدء النظر إلى الأمور من منظور مختلف. وقد لا يكون ضوء النجوم شيئًا ملموسًا بالنسبة لحواسنا البشرية، لكنه بالتأكيد ملموس لكشافاتنا [٥٠] الإلكترونية، وكل جزء صغير منه ملموس مثله مثل الضوضاء الراديوية الآتية من المجرات البعيدة والتي تأكدت فائدتها في الجدل الدائر حول طبيعة الكون. لم يؤد اكتشاف إشعاع الخلفية الكوني (الذي اتضح أن درجة حرارته تحت ٣ كلفن بالضبط) فقط إلى وضع الانفجار العظيم على قمة جدول أعمال علماء الفلك، لكنه شجع علماء الفيزياء أيضًا، الذين كانوا ينظرون إلى علم الفلك من قبل على أنه إلى حد ما نوع من الموضوعات العقيمة - أكثر اقترابًا من الفلسفة منه إلى العلم الحقيقي - على أن ينظروا إلى الكون المبكر على أنه موضوع يستحق أن تُجرى عليه أبحاث جادة.

لكن علم فلك الانفجار العظيم لم يحتل موقعه فجأة كفرع في الفيزياء يستحق بالغ الاحترام، حتى بعد اكتشاف إشعاع الخلفية الكوني. ولقد كان علماء الفلك وعلماء الفيزياء الذين تشغلهم فعلاً طبيعة الانفجار العظيم (مثل بيبليس) مقتنعين عن طيب خاطر بالطبع بأن ما تم العثور عليه هو بالفعل "صدى الانفجار العظيم". لكن باحثين آخرين كانوا يبحثون حول ما إذا كانت هناك تفسيرات بديلة. وحتى بينزياس وولسون لم يكونا متأكدين تمامًا مما عثرا عليه (حيث إنهما كانا أكثر ميلاً إلى تفضيل نموذج الحالة المستقرة)، وقدم بحثهما حول الاكتشاف مجرد تقرير عن ما لاحظاه، بدون تفسير البيانات، ولكنه أشار إلى بحث بيبليس وزملائه المرفق حول "التفسير المحتمل لتسجيل درجة حرارة الضوضاء المفرطة". وكان هناك جزء في البحث أدى أخيرًا إلى اقتناع كثير من علماء الفيزياء بأن علم فلك الانفجار العظيم علم كمي حقيقي، وليس تفكير حول معتقدات وهمية، وهو الذي نُشر بعد عامين، في ١٩٦٧، وكان يعالج كيفية طبخ عناصر الضوء في الانفجار العظيم. ومع ذلك فإنه من الأمور الحاسمة أن أحد مدخلات هذه الحسابات استخدمت ما تم رصده حول درجة حرارة إشعاع الخلفية الكوني كدليل على ما كانت عليه الأحوال بالضبط في الانفجار العظيم نفسه.

(٥٠) كشاف أو مكشاف detector: أداة للكشف عن الموجات الكهربائية أو عن النشاط الإشعاعي [illegible]

ومن الأشياء الأكثر إثارة للاهتمام فى ذلك البحث المشتمل على بذور التطور فى المستقبل حول التركيب النووى، كما يُطلق عليه، أن فريد هويل كان عضواً مهماً فى الفريق الذى أنجز هذا العمل - وهو نفسه فريد هويل الذى كان فى مقدمة المناصرين لعلم فلك الحالة المستقرة - فما الذى كان يفعله بمشاركته فى نظرية الانفجار العظيم؟ لقد كان ببساطة عالماً ممتازاً. ولا تعنى حقيقة أنه كان لديه تفضيل شخصى للنموذج المنافس حول الكون أنه كان عاجزاً عن استخدام مهارته كعالم فيزياء وعالم رياضيات للبحث فيما حدث تحت تأثير الشروط التى كانت متوافرة فى سحابة الغبار المتوهجة فى الانفجار العظيم لو كانت قد وُجدت.

وهذا الأمر يوضح بدقة مسار التطورات العلمية. كان لا بد من وجود عنصر تأمل- تخمين - قائماً على الملاحظات والتجارب السابقة، إضافة إلى حدس حول طبيعة العالم. "ماذا لو أن". يمكنك أن تتخيل إسحاق نيوتن يقول متأملاً، "الجاذبية تخضع لقانون التربيع العكسى؟" ثم يتم بعد ذلك اختبار التخمين، باستخدامها لوضع تنبؤات يمكن مقارنتها بنتائج التجارب والملاحظات حول طبيعة ما يحدث فى الواقع. لست مطالبًا بأن "تؤمن" بما تختبره، كما هو الأمر بالنسبة للإيمان الدينى. بل تضع تخميناً (أو يقدم شخص آخر هذا التخمين) ثم تختبره. وتوقع هويل أن نموذج الحالة المستقرة البسيط [٥١] كان وصفًا جيداً للكون، واختبره شخص ما فوجده خاطئًا. وتوقع آخرون أن الكون وُلد فى انفجار عظيم. واختبر هويل هذه التوقعات وعثر على دليل قاطع بأنهم على حق. وبالفعل وبطريقة أو بأخرى، ومن المثير للإعجاب إلى درجة كبيرة، أنه تم إكمال الاختبار بنوع من الشك، حيث إن هويل كما تعرف لم يكن يضلل نفسه بالآمال بعيداً عن الواقع فى تفسيره النتائج. وبطريقة مماثلة كان ألبرت أينشتاين، فى العقود المبكرة من القرن العشرين، قد توقع أن يسلك الضوء مثل سيل من الجسيمات بالغة الصغر، وهو ما نطلق عليه اليوم اسم فوتونات. وكان عالم التجارب الأمريكى روبرت ميليكان يشعر بالغيظ تجاه هذا الأمر، وأمضى عشر سنوات

(٥١) استخدمت كلمة "بسيطة" هنا عن عمد. فحتى ذلك الحين، كان هويل لايزال يناصر نوع من نماذج الحالة المستقرة أكثر تعقيداً بكثير، يمكن أن يتضمن داخله ما نطلق عليه الانفجار العظيم. ومن الناحية الأساسية يعتبر ذلك هو نفسه ما نطلق عليه عادة "علم فلك التضخم"، لكن ذلك خارج إطار الكتاب.

يحاول إثبات أن أينشتاين على خطأ. ولم ينجح إلا فى إثبات أن تخمين أينشتاين كان جيداً. وهذا أكثر إقناعًا بكثير، بالنسبة لمن هو خارج المجتمع العلمى، مما لو أن أينشتاين قد أجرى التجارب بنفسه وأعلن أنه أثبت أن تخمينه كان صحيحاً!

وتركت قدرة هويل على التركيز على مشكلة واحدة فى فترة زمنية واحدة أثراً عميقاً فى نفسى عندما كنت دارساً فى معهد علم الفلك فى كمبردج، حيث كان هويل مديراً، فى أواخر الستينيات. وكان هويل معتاداً على القول بأنه يحب أن يقسم بحثه إلى "أجزاء مستقلة"، بحيث لا يؤثر التحيز لأى جزء من بحثه على ما يفعله فى الأجزاء الأخرى. وكان يحجم دائماً عن إجراء عمليات الرصد الفلكية؛ لأنه كان يشعر أن تحيزه النظرى قد يؤثر بشكل غير واع على البيانات التى يجمعها، وقد يتجاهل بذلك شيئاً مهما لا يناسب أفكاره التى تكونت سلفاً. وكان يرى دائماً أن على القائمين بالرصد أن يقوموا بهذا العمل، بدون تحيز- وأن على علماء النظريات أن يحاولوا تفسير البيانات التى تم الحصول عليها بشكل أمين. واقتناع هويل بذلك كان أمراً ممتعًا، فقد كان يركز دائمًا على ملاحظات الرصد، ولم يحاول تفسيرها بمصطلحات نظرية، تاركًا ذلك لعلماء النظريات.

وتعود مساهمة هويل فى البحث بالغ الأهمية حول التركيب النووى فى الانفجار العظيم، ذلك البحث الذى نُظر إليه (وللسخرية، كان فى صف تحيزاته) على أنه إعلان عن وفاة نموذج الحالة المستقرة، إلى ما كان يقوم به من أبحاث فى الخمسينيات حول كيفية تشكيل العناصر داخل النجوم - التركيب النووى النجمى - وهذا هو موضوع الفصل المقبل، وكل ما نحتاج إلى معرفته هنا أنه كان واضحًا فى بداية الستينيات، إنه رغم أن العناصر الثقيلة قد تنتج فعلاً داخل النجوم،لم يكن هناك سبيل أمام الكميات الضخمة من الهليوم (التى تتراوح نسبتها بين ٢٥ و٣٠ فى المائة)، والتى تم قياسها فى النجوم بواسطة المنظار الطيفى، إلا أن يكون قد تم إنتاجها من الهيدروجين، العنصر الأكثر بساطة داخل النجوم نفسها. ويعتبر التركيب النووى النجمى هو المسئول عن نحو عشر الهليوم الموجود فى النجوم. وكان على بقية الهليوم أن تأتى من مكان آخر من المادة البدائية التى تشكلت منها النجوم فى الأصل.

كان هويل صديق قديم وشريك استثنائي لجورج جامو، وفي الخمسينيات كانا معتادين كثيراً على أن يحاول كل منهما إقناع الآخر (بأسلوب يتسم بالصداقة) بأن فكرته العزيزة إليه (الانفجار العظيم بالنسبة لجامو والحالة المستقرة لهويل) خاطئة. وكانت النتيجة أن عرف هويل قدراً كبيراً عن أعمال جامو، وكان ضمن القليل من علماء الفلك الذين ظلوا مدركين، في بداية الستينيات، أهمية التنبؤ بوجود بحر من إشعاع الخلفية الكوني . رغم عدم معرفة هويل بالسهولة التي يمكن بها العثور على هذا الإشعاع. لكن الأمور تطورت منذ الأربعينيات، مع توافر فهم أفضل للجانب النظري من الفيزياء النووية، والتحديد التجريبي الأفضل لمعدلات حدوث التفاعلات النووية المهمة في ظروف استمرار الانفجار العظيم. وخلال إعداد هويل لمنهج محاضرات حول علم الفلك، في كمبردج للعام الأكاديمي ١٩٦٣/١٩٦٤، قرر أن مشكلة الهليوم بالغة الصعوبة حتى أنها تستحق إعادة الحسابات التي أجراها فريق جامو حتى يتم أخذ آخر نتائج الفيزياء النووية في الاعتبار. وتم إنجاز هذا العمل بواسطة هويل وزميله روجر تايلور، وظهرت النتائج في بحث نُشر في ١٩٦٤ ، ومثلهما مثل فريق جامو، توصلا إلى نتيجة مفادها أنه إذا كان قد حدث انفجار عظيم، فإن الكمية المطلوبة من الهليوم بشكل تقريبي تكون قد أُنتجت إذا كانت المادة قد عولجت في سحابة الغبار المتوهجة ذات الحرارة المرتفعة. وبكلماتهما "الحذرة" فإن نتائج حساباتهما "يمكن تفسيرها على أنها دليل على أن الكون لم يكن له أصل مفرد". وتبعاً للحسابات الجديدة لهويل وتايلور فإن سحابة الغبار المتوهجة كانت عالية الطاقة حتى أنه كان هناك نحو مليار فوتون لكل نوية (كل فوتون أو نيوترون). ولم تكن الأرقام دقيقة؛ لأن هويل وتايلور كان لديهما فكرة تقريبية فقط عن كمية الهليوم البدائي اللازم إنتاجه في سحابة الغبار المتوهجة. لكن المليار فوتون لكل نوية ظهرت من الانفجار العظيم كان هو الإشعاع الذي يمكنه تشكيل إشعاع الخلفية الكوني الذي يُرصد في وقتنا الراهن.

وكجزء من هذا البحث، حسب تايلور درجة حرارة إشعاع الخلفية في الكون الراهن، مفترضاً وجود خليط من نحو ٢٥ في المائة من الهليوم و٧٥ في المائة من الهيدروجين، بما يتناسب مع عمليات الرصد بمقياس الطيف للنجوم الأقدم، التي نتجت من الانفجار العظيم. ومع ذلك، حدث لمرة واحدة أن ترك هويل تحيزاته تتغلب عليه،

وحدث، كما يحكي تايلور بحزن في وقت لاحق من حياته، أن تم التقليل من أهمية هذا الجانب من بحثهما في نسخة البحث المنشورة.

أثار بحث هويل وتايلور اهتماماً بالتركيب النووي في الانفجار العظيم، الذي حاز مزيداً من الاهتمام باكتشاف إشعاع الخلفية الكوني، الذي أعلن في العام التالي.

وطور هويل نفسه بحثه إلى حد أبعد مع صديقه ويلي فوار (الخبير في الفيزياء النووية) في كالتيك، وتلميذ فوار، روبرت فاجونر. وفي ١٩٦٧ نشر فريق فاجونر وفوار وهويل نتائج حساباتهم الأكثر تفصيلاً بكثير حول التركيب النووي في الانفجار العظيم، التي لم تتفق فقط مع وفرة الهيليوم كما تشير إليها الحسابات ولكن أيضاً وفرة العنصرين الخفيفين الليثيوم والديوتريوم في تركيب النجوم الأكثر قدماً، مع معايرة كل شيء على درجة الحرارة التي تم قياسها لإشعاع الخلفية الكوني ٢,٧٦ كلفن. ولم تكن حسابات الفيزياء النووية هي الوحيدة التي جعلت الانفجار العظيم جديراً بالاحترام، ولكن أيضاً التوافق مع إشعاع الخلفية الكوني هو الذي جعل تفسير هذا الإشعاع نفسه محترماً بصفته أثر من آثار الانفجار العظيم، وأقنع من يشكون بأنه كان فعلاً صدى انبثاق سحابة الغبار الملتهبة. لقد كانت لحظة مولد علم فلك الانفجار العظيم.

كانت هذه الإنجازات صاعقة تماماً، وتركت أثراً بالغاً في نفسي في بداية حياتي المهنية في مجال علم الفلك. وفي خريف عام ١٩٦٦ بدأت منهج ماجستير في علم الفلك في جامعة سوسيكس، وكانت أول محاضرة مهمة أحضرها كطالب تلك التي قدمها فاجونر في كمبردج (وكانت أيضاً المرة الأولى التي أزور فيها كمبردج)، تشرح هذه الإنجازات، ولم يكن البحث قد نُشر بعد. وكان من الواضح، حتى بالنسبة لطالب جديد، أنها لحظة تحول علم فلك الانفجار العظيم إلى علم محترم، والآن يمكن مقارنة الأرقام التي توقعتها النظرية بالأرقام التي يمكن قياسها بواسطة علماء تجارب الفيزياء النووية في المختبرات، أو يمكن رصدها بدراسة تركيب النجوم. وصاحبت هذه الإنجازات إشاعات هائلة ليس فقط لأنها كانت نقطة تحول مهمة في العلم، ولكن أيضاً لقلة من علموا بها حيث كنت في ذلك الوقت أحد القلائل في العالم كله - ربما واحد من مائة الذين يعرفون بهذا الأمر.

وبالطبع فإنه تم تحسين الحسابات (وبيانات الرصد والتجارب) منذ ١٩٦٧، لكن الصورة مازالت هي نفسها من الناحية الأساسية. ولمعرفة مصدر العناصر التي تشكلنا منها، من المهم تقدير ما نتج من الانفجار العظيم على أنه كان خليطاً من نحو ٧٥ هيدروجين وأقل من ٢٥ في المائة فقط من الهليوم، ونسبة قليلة متناثرة (لكن يمكن حسابها بدقة تامة) من العناصر الخفيفة جداً مثل الديوتريوم والليثيوم. ولم يكن هناك البتة أثر للعناصر الأكثر ثقلاً جديرة بالاهتمام (تلك التي تشكلنا منها) ـ الكربون والاكسجين والنتروجين وما تبقى ـ ولا ذرة واحدة، تبعاً لهذه الحسابات. لذلك فأهم سؤال هو، كيف تحولت المادة البدائية الخفيفة جداً إلى المادة التي تشكلنا منها؟ وتم التوصل إلى إجابة عن هذا السؤال بالفعل في الخمسينيات، قبل أن يصبح نموذج الانفجار العظيم راسخاً تماماً.

الفصل السابع

الزوجان بوربيدج وفولر وهويل

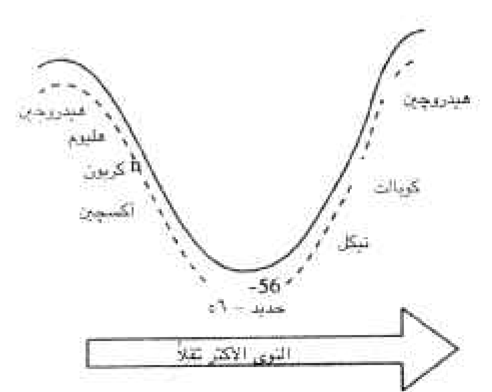
بدأ الانهماك الطويل لفريد هويل في البحث عن أصل العناصر الكيميائية في ١٩٤٤، عندما كان عمره تسع وعشرين عاماً، وكان يعمل في الرادار ضمن المجهود الحربي البريطاني. وفي ذلك العام حمله عمله ضمن بعثة اتصالات حربية إلى الولايات المتحدة وكندا. وخلال وجوده في لوس أنجلوس في أعمال رسمية، وجد بعض الوقت في إجازات نهاية الأسبوع لزيارة علماء الفلك في مختبر مونت ولسون، حيث أثارت مناقشة مع والتر باد اهتمامه بالانفجارات النجمية الهائلة، نجم النوفا والسوبرنوفا[٥٢] بشكل خاص. وبعد وقت قليل، خلال رحلة هويل إلى كندا، تقابل مع فريق من علماء الفيزياء النووية البريطانيين يقيمون بالقرب من مونتريال. وكانوا هناك ظاهرياً للعمل مع فريق في شيكاغو لبناء أول مفاعل نووي في العالم – لكنهم في الحقيقة، كما أوضح هويل، كانوا "مركز تنصت" يحاول التقاط تفاصيل حول مشروع مانهاتن (مشروع إنجاز أول قنبلة ذرية) الذي يحاول الأمريكيون المحافظة عليه في السر، حتى بالنسبة لأقرب حلفائهم. وهناك التقط هويل نفسه من المعلومات حول مشروع القنبلة الذرية ما يكفي ليجعله يتساءل ما إذا كان انفجار السوبرنوفا يحدث بطريقة التقنية نفسها التي (ولم يخبره أحد بل استنتج ما توصل إليه من خلال ما حاولوا إخفاءه) أن صانعي

(٥٢) نجم النوفا (النجم الجديد) nova: نجم مستعر يتزايد ضياؤه فجأة ثم يخف بالتدريج حتى يرجع إلى ضوئه المعتاد خلال فترة أسابيع إلى سنوات. وسوبرنوفا (المتجدد الأعظم) supernova: ظاهرة سماوية نادرة الحدوث ينفجر فيها النجم ويظهر جسم لامع لفترة قصيرة ويُصدر كمية كبيرة من الطاقة. المترجم

القنبلة يستخدمونها – انفجار أولى يدفع المادة لأن تندمج معًا عند درجات حرارة وضغوط بالغة الارتفاع، تهدف إلى إحداث انفجار أكبر عندما تندفع المادة من الداخل إلى الخارج وتفجر نفسها إلى شظايا.

وعندما عاد هويل إلى إنجلترا فكّر فى الموضوع فى وقت فراغه خلال شتاء ١٩٤٤/ ١٩٤٥. كان يعلم أن الاندماج النووى يحدث لأن توازن الطاقة يفضل إنتاج العناصر الثقيلة من العناصر الخفيفة، لكن ذلك لا يتجاوز حدوداً معينة. وتنظيم البروتونات والنيوترونات على هيئة نواة هليوم مفضّلة – من ناحية الطاقة – مما إذا كان العدد من الجسيمات نفسه منظم على هيئة نواة هيدروجين، ونواة الكربون مفضّلة من ناحية الطاقة أكثر حتى من نواة الهليوم، وهكذا. لكن تظل هناك المشكلة القديمة حول الحصول على جسيمات ذات شحنة موجبة مثل البروتونات أو جسيمات ألفا الحصول على حركة سريعة كافية لاختراق مجال التنافر الكهربائى حول النواة حتى يحدث الاندماج. وحتى بمساعدة ظاهرة النفق، فإنه من الأكثر صعوبة أن يخترق جسيم آخر ذو شحنة موجبة نواة تحتوى على مزيد من البروتونات، لأنه يكون هناك المزيد من الشحنة الكهربائية التى يجب التغلب عليها. لذلك فإن كل خطوة فى العملية قد تحتاج إلى طبخ أكثر سخونة، حتى لو كان المنتج النهائى يمثل حالة نووية مفضّلة من ناحية الطاقة.

وبهذه الطريقة فى التفكير تصبح النوى المفضّلة هى تلك الخاصة بعناصر مثل النيكل والحديد ("مجموعة عناصر الحديد"). مما يجعل النوى الأكثر ثقلاً من ذلك تتطلب تزويداً بالطاقة، أكثر وأعلى من الطاقة المطلوبة للتغلب على التنافر الكهربائى. ويمكن إنجاز هذه العملية إذا كان النجم الذى يتكون فى معظمه – مثلاً – من نوى كربون وأكسجين متداخلة فى بعضها البعض (الانفجار الداخلى)، تنبعث منه كمية ضخمة من طاقة الجاذبية كافية لتكوين كميات كبيرة من عناصر مثل الحديد، وعدد قليل متناثر من العناصر الأكثر ثقلاً، فيتهشم كثير من النوى إلى أجزاء بالغة الصغر، وتنبعث فيضانات من البروتونات والنيوترونات، فيفجر النجم نفسه إلى شظايا. فهل من الممكن، هكذا تساءل هويل، أن يكون هذا ما يحدث فى السوبرنوفا؟



شكل (٧ – ١) "وادى التوازن": النوى الأكثر استقراراً هى تلك الموجودة فى النطاق الأوسط من الكتل، وتتمركز حول الحديد – ٥٦. و"تميل" النوى الخفيفة (على اليسار) لأن تندمج معاً لتكوين نوى أكثر ثقلاً، لتطلق طاقة وتتدحرج إلى أسفل الوادى عندما تفعل ذلك. ولإنتاج نوى أكثر ثقلاً من الحديد – ٥٦، يجب الحصول على مدد من الطاقة لتكوين نوى متماسكة معاً، لدفعها إلى أعلى على الجانب الآخر من الوادى.

وعندما أجرى هويل حساباته فى ربيع ١٩٤٥ (بأفضل ما فى قدرته فى الظروف الصعبة فى زمن الحرب)، واستنبط الشروط المطلوبة لإنتاج عناصر بالنسب الموجودة على الأرض، اكتشف أنه لا بد للنجوم التى طُبخ الحديد فيها أن تصل إلى درجة حرارة قريبة من ٥ مليارات درجة – وهى درجة هائلة مقارنة بدرجات الحرارة فى قلب نجوم التتالى الرئيسى، التى قد تتراوح بين ١٥ مليون و٢٠ مليون درجة. من هنا فكّر هويل، حيث إننا نعرف أن الحديد موجود فى الكون، فإن كل درجات الحرارة بين ٢٠ مليون و٥ ملايين درجة لا بد أنها كانت موجودة فى مكان ما داخل النجوم خلال مسار تطورها. ويمكن للتفاعلات النووية التى تصاحب هذا النطاق الواسع من درجات الحرارة أن تنتج بالتأكيد كل العناصر بالنسب المرصودة بالضبط. على الأقل هذا ما

حدث، كما كان يأمل هويل. وكانت التفاصيل لا تزال غامضة، لكن هويل كان لديه إطاراً واضحاً بعد أن ترك العمل في الرادار وعاد إلى الحياة الأكاديمية في كمبردج في صيف ١٩٤٥ ، وكان أول بحث ناقش فيه هذه الأفكار حول أصل العناصر قد نُشر في العام التالي - وهو العام نفسه، ١٩٤٦، الذي كان فيه جامو وتلاميذه قد بدأوا يقترحون إمكانية أن تكون كل العناصر الكيميائية قد تشكلت معًا في سحابة الغبار الملتهبة في الانفجار العظيم.

والسمة المهمة في نموذج جامو (بغض النظر عن حقيقة أن كل شيء كان يُنظر إليه على أنه قد حدث في الانفجار العظيم) هي أن العناصر الأكثر ثقلاً تشكلت من الهيدروجين باطراد، مع إضافة النيوترونات الموجودة في النوى. والخطوة الأولى تشبه إلى حد بعيد (ولا تتطابق مع) سلسلة البروتون - بروتون التي تعمل (كما أصبحنا نعرف الآن) داخل الشمس. حيث يأسر بروتون نيوتروناً من الديوتريوم. وتأسر بعض من عنصر الديوتريوم نيوتروناً لتشكيل تريتيوم، وهي نواة غير مستقرة من هيدروجين -٣ التي تنحل فوراً، مطلقة إلكترون (وتُعرف هذه العملية بتحلل بيتا) بينما يتحول أحد النيوترونات إلى بروتون. وبذلك تصبح النواة نواة هليوم - ٣، ويمكنها أن تأسر نيوترون آخر من الهليوم - ٤ (جسيم ألفا)، وهكذا. وأسر نيوترون وتحلل بيتا هو كل ما يحتاجه الأمر، كما قال جامو، لإنتاج كل العناصر.

ويقدر بساطة هذه الفكرة حدث لها أمران في الأربعينيات. الأول أن علماء التجارب توصلوا إلى أنه من الناحية الافتراضية تمتص كل النوى فعلاً نيوترونات إذا تم إطلاقها عليها. وهناك حتى ما هو أفضل من ذلك، حيث أشارت بعض التجارب الأكثر تعقيداً أن معدلات التفاعل في هذه العملية للنوى المختلفة ("أسر النيوترون بشكل مستعرض"، بالمصطلح التقني) أدت إلى تنبؤ بالوفرة النسبية للعناصر التي تتفق إلى حد بعيد مع الوفرة المرصودة - حقًا، لقد كان هذا التوافق بين النظرية والملاحظة حجر أساس لنوع التركيب النووي الذي اقترحه هويل (الذي يحدث داخل النجوم، وليس في الانفجار العظيم، لكنه يظل يتضمن عمليات أسر النيوترون). ويجب أن تكون النوى التي تحسن أسر النيوترونات نادرة؛ لأنها تتحول بسرعة إلى عناصر أخرى، وتلك النوى غير الماهرة في أسر النيوترونات يجب أن تكون شائعة نسبيًا، لأنها تمثل

عنق الزجاجة في هذه العملية. ويمكن أن نتعامل كميًا مع هذه الظواهر، وهي التي تمثل وجود اتفاق جيد معقول بين التجربة والملاحظة.

ورغم أن جامو المتحمس كان يميل إلى التخلي عن صعوبات إنتاج عناصر أكثر ثقلاً من الهليوم كتفاصيل غير مهمة، فحتى رالف ألفير وروبرت هيرمان كانا، بعد عدة سنوات من بحث ١٩٤٦، قد أثارا الاهتمام بصعوبتين في النموذج. والصعوبة الأولى مثيرة للقلق، لكن لم يبد عليها، في ذلك الوقت، أنها عصية على المعالجة: لقد حدث الانفجار العظيم بسرعة فائقة. وبالتقريب، وهو أمر جعله ستيفن وينبيرج مشهوراً في كتابه الذي تصدر أكثر الكتب مبيعًا، فإن الشروط التي يمكن أن يحدث فيها التركيب النووي في الانفجار العظيم استغرق وقتًا لا يتجاوز ثلاث دقائق. فهل كان هذا الوقت كاف بالفعل لأسر كل النيوترونات وتحلل بيتا الضروريين لإنتاج كل هذه التنويعة والوفرة من العناصر الكيميائية الموجودة في الكون في وقتنا الراهن؟ لكن هذه المشكلة تلاشت إلى مجرد شيء تافه مقارنة بالمشكلة الأخرى، والتي كانت واقعيًا عصية على المعالجة، مع فكرة أن كل العناصر تشكلت فقط بأسر النيوترون وتحلل ألفا، إما في الانفجار العظيم أو أي شيء آخر، ولا توجد نواة مستقرة تحتوي على إجمالي خمس نويات، ولا يوجد أيضًا نواة مستقرة تحتوي على ثمان نويات. لذلك هناك فجوتان في سلم الكتل الذرية، بالضبط في بداية العملية. ومن الممكن، في تجارب على الأرض، إنتاج هيليوم - ٥ بإطلاق نيوترونات على هليوم - ٤ . لكنه يُطلق خارجه بسرعة النيوترون الزائد، ويعود إلى هليوم - ٤ - بسرعة فائقة، قبل أن يمتص أي نيوترونات أخرى. وبالمثل، من الممكن إنتاج بيريليوم - ٨ صناعيًا، لكنه في الغالب ينقسم إلى نواتي هليوم - ٤ . ولا يوجد هليوم - ٥ بشكل طبيعي، ولا يوجد بيريليوم - ٨ طبيعي. وإذا كان أسر النيوترون هو الطريقة الوحيدة لإنتاج العناصر الأكثر ثقلاً من الهليوم، فقد يكون من المستحيل للطبيعة أن تُنتج كل هذه العناصر، لا في الانفجار العظيم ولا في داخل النجوم. هناك شيء آخر مطلوب، بالإضافة إلى أسر النيوترون، أينما تم إنتاج هذه العناصر.

وكانت الطريقة التى حل بها مشكلة فجوتى الكتل هى أهم ما فى اكتشافه الذى أدى - فى الخمسينيات - إلى فهم تام لكيفية إنتاج العناصر الكيميائية داخل النجوم. وأهم ما فى النجوم كمصانع لإنتاج العناصر أنها تعيش فترة بالغة الطول. فإذا كان كل شىء قد حدث خلال ثلاث دقائق، فلا بد أن تكون كل العمليات المشاركة بالغة الكفاءة. ولكن بالنسبة لنجم يعيش ملايين، أو حتى مليارات، السنوات، فيكون هناك من الوقت ما يكفى حتى للأحداث النادرة لتلعب دورها فى العملية الإنتاجية الشاملة. وفى ١٩٥١، اقترح عالما فلك، هما إرنست أوبيك وإدوين سالبيتر، كل على حدة، طريقة لتخطى فجوتى الكتلة فى وقت واحد، باستخدام تفاعل نووى ثانوى نادر. فقد فكرا أنه إذا كان هناك ثلاث نوى هليوم - ٤ (ثلاثة جسيمات ألفا) تتصادم ببعضها البعض معًا فى وقت واحد داخل نجم، فيمكنها أن تلتحم لتكوين نواة مفردة من كربون - ١٢، دون الارتباك بين إنتاج أى من الهليوم - ٥ أو بيريليوم - ٨ خلال مسار العملية.

وتمثلت المشكلة فى أنه حتى خلال حياة النجم قد لا يستطيع هذا التفاعل النادرة أن ينتج كمية ذات شأن من الكربون. وكان هناك فى الواقع مشكلتان - الأولى أن عملية ألفا الثلاثية، كما أصبحت تسمى، كانت بالغة الندرة لدرجة أنها قد تُنتج مجرد كمية بالغة الضآلة من الكربون. والثانية أن كربون - ١٢ نفسه يتفاعل بشراهة إلى حد ما مع هليوم - ٤ ، ويمتص جسيم ألفا ويصبح نواة أكسجين - ١٦ ؛ لذلك يجب أن يتحول كل الكربون القليل الذى أُنتج بواسطة عملية ألفا الثلاثية إلى أكسجين بمجرد إنتاجه تقريبًا. لكننا نعلم أن هناك كمية كبيرة من الكربون فى الكون. لذلك فكّر هويل بأنه لا بد من وجود شىء خاص بالنسبة لعملية ألفا الثلاثية هو الذى يجعلها تحدث بكثير من التكرار (أكثر كفاءة) مما يُظن أنه ملائم للوهلة الأولى.

وأفضل تصور لما يحدث لا يشبه على وجه الدقة تصادمًا بين ثلاثة جسيمات ألفا فى وقت واحد داخل قلب النجم، لكنه يشبه عملية مزدوجة المراحل. فيجب أن تتصادم جسيمات ألفا (نوى هليوم - ٤) مع بعضها البعض تحت هذه الشروط على وجه الدقة عادة، لتشكيل نوى بيريليوم - ٨ التى تنقسم متباعدة بسرعة [٥٢] . وبسبب أن نوى

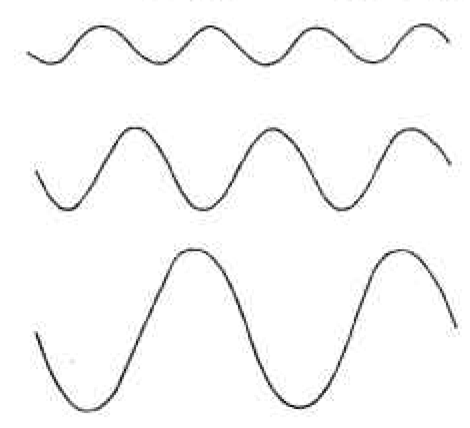
(٥٢) إلى أى حد من السرعة؟ طول حياة البيريليوم - ٨ نحو $١٠^{-١٩}$ ثانية، أى علامة عشرية يتلوها ١٨ صفر ثم واحد، وهى "جزء من ثانية" تحت أى تعريف.

بيريليوم - ٨ يتم إنتاجها طوال الوقت، تكون هناك باستمرار نسبة منها موجودة - فيصل عدد نوى بيريليوم - ٨ إلى نحو نواة من بين كل ١٠ مليار فى النجم فى درجة حرارة مركزية نحو ١٠٠ مليون درجة. ولا يستمر أى من نوى بيريليوم - ٨ أكثر من جزء من الثانية، لكن بمجرد تحطمها متباعدة تحل محلها نوى بيريليوم - ٨ جديدة. لذلك بحث هويل عن شىء يمكنه أن ينجز هذه العملية بحيث تتعلق نوى بيريليوم - ٨ النادرة هذه بجسيم ألفا آخر ذو كفاءة كافية لأن يتحول كثير من هذه النوى إلى نوى كربون قبل تحللها.

وجاءت الأحداث متزامنة معًا فى ١٩٥٢، حيث كان هويل مدعوًا لقضاء الأشهر الثلاثة الأوائل من هذا العام فى كالتيك، وكان عليه أن يلقى سلسلة من المحاضرات حول عملية التركيب النووى. وكان ضمن التجهيزات لهذا الأمر أن يقدم وجهة نظر حاسمة مستفيضة حول إمكانية إنتاج الكربون داخل النجوم، وقرر أن ذلك ممكن فقط إذا استطاعت نواة كربون - ١٢نفسها أن توجد فى الحالة التى يطلق عليها حالة مستثارة، أو رنين. ولم يمثل ذلك مفاجأة فى حد ذاته - حيث يمكن لكل النوى أن توجد فى حالات مستثارة. ولكن الشىء غير العادى فى فكرة هويل كان أن ذلك يتطلب أن تكون لرنين طاقة كربون ١٢ - قيمة محددة بدقة _ولم تكن هناك تجربة - كما يعلم هويل تمامًا، قد قاست من قبل رنين الكربون بهذه الطاقة.

ويمكنك تصور أحوال الرنين هذه بأنها تشبه إلى حد ما التوافقات الأعلى التى يمكن عزفها على وتر جيتار ممسوك. والوتر الحر يعطى نغمة موسيقية خاصة (تماثل ما يطلق عليه الحالة الأساسية للنواة)، لكن يمكنه أيضًا أن يهتز عند مجموعة من التوافقات الأعلى، التى تتحدد تبعًا لطول الوتر (وهو ما يماثل حالات الرنين بالنسبة لنوع معين من النوى). فإذا لم يكن هناك رنين عند مستوى الطاقة الذى حسبه هويل، يمكنك أن تتوقع جسيم ألفا يتحرك بسرعة ويتصادم مع نواة بيريليوم - ٨ مفردة لتفجرها. لكن إذا كان هناك رنين فى نواة كربون -١٢ عند الطاقة المطلوبة تمامًا، يمكن لجسيم ألفا الوارد أن يُحدث بسهولة ثقبًا صغيرًا ضيقًا فى مكان ما من النواة، لتحول حالة كربون - ١٢ مستثارة، مما يتيح لكربون - ١٣ إشعاع طاقة حينئذ (على هيئة إشعاع جاما) ويستقر فى حالة نواة كربون عادية غير مستثارة، فى حالتها الأساسية.

ويحدث ذلك حتى لو لم تكن نواة كربون – ١٢ قد وُجدت بعد حتى يحدث لها رنين. ويؤدى تأثير تصادم جسيم ألفا مع نواة بيريليوم – ٨ إلى إيجاد نوع مستثار من كربون – ١٢ . وبطريقة التماثل يمكننا القول إن النغمة الموسيقية لا توجد إلا إذا تم النقر على وتر الجيتار ـ إن لها احتمال وجود، لكنها توجد بفعل النقر على الوتر. وكانت متطلبات الفيزياء الفلكية لكي يوجد رنين كربون – ١٢ بالغة الدقة حتى أن هويل استطاع حساب الطاقة اللازمة للرنين: ٧,٦٥ مليون إلكترونفولت MeV فوق الحالة الأساسية لكربون – ١٢ . فإذا كان مستوى الطاقة أعلى من ذلك بمجرد ٥ فى المائة، لن تحدث العملية. وقدّم هويل هذه الفكرة إلى ويلى فولر فى كالتك، وسأله ما إذا كان من الممكن أن يكون لكربون – ١٢ هذا الرنين اللازم.



شكل (٧ - ٢) : يمكن تشبيه رنين نواة كربون – ١٢ مستثارة بطريقة عزف النغمات الموسيقية المتنوعة على وتر مفرد لجيتار. فكل نغمة تناظر تنويعة مختلفة من النغمات الأساسية للوتر، لكن النغمات المختلفة (ذات أطوال الموجات المختلفة) يجب أن تتوافق جميعاً مع طول الوتر مع تثبيت طرفيه. وبالمثل فإن الحالة المستثارة لكربون – ١٢ يمكن تصورها على أنها نغمة مرتفعة تُعزف على وتر كربون – ١٢ الأساسى.

والقصة كما تعود فولر حكايتها، أنه ظن أن هويل مخبول، لكن مع إصرار الضيف القادم من إنجلترا، شكّل فولر فريقًا صغيراً لإجراء التجربة اللازمة، غالبًا بإمساكات فريد أكثر من احتمال إثبات أن وجهة نظره صحيحة [٥٤] . وبالطبع لقد أثبت الفريق أن هويل على حق ، وهذا مثال مذهل إلى حد بعيد فى تاريخ العلم كله لنظرية يقدم تنبؤًا يتم اختباره تجريبيًا ويثبت صحته. ومن مجرد حقيقة أن الكربون موجود، ومع فهم أساسى لدى السخونة داخل الكواكب، تنبأ هويل بما يبدو أنه قيمة الخاصية الفريدة لنواة الكربون بدقة أعلى من ٥ فى المائة. وبمساعدة فولر وزملائه تخطى هويل فجوة الكتلة وأوضح كيف يمكن للنجوم أن تنتج عناصر أكثر ثقلاً من الهليوم [٥٥] .

لكن كل هذا الموضوع استند إلى ثلاث مصادفات مهمة جديرة بأن نوضحها قبل إلقاء نظرة على تفاصيل كيفية إنتاج العناصر الأكثر ثقلاً. الأولى وقد تكون بالفعل مدهشة (من وجهة النظر البشرية) إذا كان بيريليوم – ٨ مستقر، أو حتى إذا كان أقل ثباتاً ولو بقدر بسيط مما هو عليه، وإذا كانت العملية التى تحوّل جسيمين ألفا إلى نواة بيريليوم – ٨ مفردة أكثر كفاءة بكثير مما هى عليه، عندما تكون النجوم قد استخدمت كل وقود الهيدروجين الموجود داخلها، فإن الهليوم كان سيتحول فجأة إلى بيريليوم، مطلقاً طاقة بالغة الضخامة قد تؤدى إلى انفجار النجم، ولم يكن للعناصر الثقيلة جداً أن توجد أبداً. والثانية أن رنين كربون – ١٢، كما رأينا، بالكاد عند المستوى المطلوب لجسيم ألفا المخترق للنواة لكى يتسلل برقة فى مكان خلال ارتباطه بنواة بيريليوم – ٨ ولو كان هذا المستوى أعلى بقليل، لكانت عملية ألفا الثلاثية بالغة الندرة فلا ينتج سوى كميات بالغة الصغر من الكربون، حيث كانت النوى ستتحول جميعاً إلى أكسجين، ولم يكن ليوجد أى كربون فى الكون. والثالثة، أنه تصادف وجود رنين مماثل فى الأكسجين

(٥٤) يتذكر هويل شيئاً مختلفاً فيما يخص هذا الموضوع، ويرى أن أقل ما يمكن قوله إن فولر لم يعبر [illegible] بشكل صريح عن شكوك حول سلامة أفكار هويل.

(٥٥) ولا ينقص من إنجازات هويل وفولر القول، من أجل الدقة التاريخية التى تكثر حولها الشكوك، إن دورية واحدة كانت قد أشارت إلى وجود مستوى مستثار للكربون – ١٢ فى الثلاثينيات، لكن التجارب الأخرى فشلت فى إثبات ذلك، لذلك فإنه مع ظهور هويل كان قد تم نسيان هذه الإشارة، وتنبؤه بما سوف يتأكد منه [illegible] نوع من العبقرية الأصيلة.

- ١٦ . وله حالة مستثارة عند طاقة ٧,١٩ مليون إلكترونفولت MeV أعلى من حالة الطاقة الدنيا لهذه النواة على وجه التحديد. لكن كمية الطاقة التى يمكن الحصول عليها عندما يتفاعل جسيم ألفا مع نواة الكربون - ١٢ فى الشروط الموجودة داخل النجوم هى ٧,١٢ مليون إلكترونفولت. فلو كان هذان الرقمان مختلفين، أو لو كان رنين طاقة الأكسجين - ١٦ . أقل بنسبة واحد فى المائة فقط مما هو عليه بالفعل، لتحول كل الكربون الناتج داخل النجوم بسرعة إلى أكسجين - ١٦ . ونقول من جديد، إنه فى هذا الوضع لم يكن ليوجد بالتأكيد أشكال حياة تعتمد على الكربون وتتسبب فى الحيرة تجاه أصل العناصر. وكل ذلك قد يكون مجرد صدفة، أو قد يوحى إلينا بالحقيقة الراسخة حول طبيعة نشاط الكون - وهى نقطة سوف أعود إليها لاحقًا. أما الآن، مع تخطى فجوة الكتلة، فإن الوقت قد حان لاستكمال قصة عملية التركيب النووى للنجوم.

وهناك جانبان فى هذه الحكاية. الأول استنباط الفيزياء النووية اللازمة - مثل الأسر المستعرض للنيوترون - وطريقة إضافة جسيمات ألفا إلى النوى (والذى يعرف حاليًا بعملية ألفا). والثانى توضيح كيف وُجدت الشروط اللازمة داخل النجوم لكى تتم هذه العمليات المطلوبة. وسوف أتناول هذين الموضوعين بهذا الترتيب، رغم أن الأبحاث قد تم إنجازها بالفعل بتطوير هذين الجانبين بشكل متوازى، وكان التقدم فى أحد الجوانب يحث على تطور الجانب الآخر، ويقوم بعملية تغذية مرتدة لصالح الجانب الآخر، وهكذا.

ظهر أول بحث رئيسى لهويل حول عملية ألفا والتفاعلات النووية التى تصاحبها، وتفسر كيف تمت عملية تركيب كل العناصر من الكربون حتى النيكل فى النجوم، عام ١٩٥٤ . لكن هذا البحث كان لا يزال محاولة أولية لشرح عملية التركيب النووى فى النجوم، مع تفاصيل كثيرة لم تكن عُرفت بعد حول كيفية إنتاج هذه العملية للوفرة المرصودة للعناصر فى الطبيعة بهذه الدقة. وبعد عودة هويل إلى إنجلترا، أدت مهام التعليم فى كمبردج ووضع التعليقات على المشروعات البحثية إلى تخليه عن أبحاث عملية التركيب النووى مؤقتًا. لكن حدث أن زار فولر كمبردج فى العام التالى خلال إجازة، تعطى كل سبع سنوات، من وظيفته فى كالتيك. وفى كمبردج تعرف على الفريق البريطانى المكون من زوج وزوجته جيوفرى ومارجريت بوربيدج، اللذان كانا مشغولان

ويفكران مليًا فى القيمة الدقيقة لوفرة العناصر المختلفة فى النجوم كما أظهرتها التطورات الجديدة فى علم الأطياف الفلكى للنجوم.

كانت مرجريت بوربيدج تعمل بشكل دائم عالمة فلك، لكن جيوفرى بوربيدج كان عالم فيزياء تشرب علم الفلك خلال عمله مع مرجريت. ورغم أبحاث فولر على اختبار تنبؤ هويل حول رنين الكربون، كان فى ١٩٥٤ أقرب بكثير لأن يظل أيضًا عالم فيزياء نووية - لكنه كان أيضًا على وشك أن يتشرب الفيزياء الفلكية بشكل موسع. وعالج الزوجان بوربيدج وفولر مشكلة تفسير وفرة العناصر فى النجوم، وتوصلوا إلى أنه يمكن فعلاً تفسير كثير من السمات المرصودة إذا كان هناك إمداد مستمر بالنيوترونات يمكن للنوى أن تمتصه، تمامًا بالطريقة نفسها التى تصورها جامو - مع وجود تحلل نشط فى الوقت نفسه فيما بينها. وأصبح ذلك يُعرف بمصطلح عملية [illegible]، حيث [illegible] تعبير عن "بطئ". وظل هويل على علاقة بهذه الأبحاث، وكان على درجة من الحماس [illegible] للمشاركة فى الحسابات كلما أتاحت له تعليقاته على المشاريع البحثية ذلك. لكنه استطاع التفوق على ما جاءت به الأنباء المبكرة حول الاختراق الذى تم على الجانب الآخر من الأطلنطى بواسطة عالم الفيزياء النووية الكندى آلاستير كاميرون.

كان السؤال الواضح الذى يجب طرحه حول أسر النيوترون داخل النجوم هو: من أين جاءت النيوترونات؟ إذا تركت النيوترونات الحرة وشأنها فإنها تتحلل إلى بروتونات والإلكترونات (إضافة إلى نيوترينوات) فى عدة دقائق. وليس هناك مشكلة فى محاولة [illegible] العناصر كلها تظهر فى الدقائق الثلاثة التى يتيحها الانفجار العظيم، لكن [illegible] صعوبة جادة إذا أردت قضاء مليارات السنوات لإنتاج هذه العناصر داخل النجوم. وكتب كاميرون بحثًا يقول فيه إن النيوترونات قد تكون تواجدت داخل النجوم بواسطة تفاعل شارك فيه نظير كربون - ١٣. فعندما يمتص كربون - ١٣ جسيم ألفا، [illegible] إلى نواة أكسجين - ١٦ ، ويطلق نيوترونًا خلال هذه العملية. وكان ما توصل إليه كاميرون مبتسرًا بشكل ما لأنه لم يستطع فى ذلك الوقت تفسير كيفية إنتاج كربون - ١٢ داخل النجوم. وكانت النتيجة أنه عندما قدم بحثه إلى "مجلة الفيزياء الفلكية [illegible]، أوصى حكمين برفضه. ولم يطمئن محرر المجلة سوبراهمانيان شاندراسيكار إلى هذا القرار، وخطى خطوة غير عادية بأن طلب رأى طرف ثالث، وكان الشخص

الذى لجأ إليه هو هويل، الذى رأى فيما وصل إليه كاميرون استبصاراً عميقاً، وأوصى بنشر البحث. وظهر البحث مطبوعًا فى ١٩٥٥، وأتبعه كاميرون بعمل دوب مطابق من الناحية الأساسية، رغم استقلاليته، لأبحاث هويل وفولر والزوجين بوربيدج خلال السنوات القليلة التالية، خاص حسابات عمليات أسر النيوترون. ومنذ ذلك الحين عرف علماء الفيزياء الفلكية أيضًا التفاعلات النووية التى تحدث داخل بعض النجوم بالقرب من نهاية أعمارها وتصنع بالفعل كل كربون - ١٣ بالغ الأهمية. ورغم أن كاميرون يستحق التقدير الكامل لمساهمته المهمة فى فهم عمليات التركيب النووى (٥٦) ، فإن التجميع الكامل الحاسم لكل جوانب الموضوع تم إنجازه فى الواقع بواسطة هويل وفولر والزوجين بوربيدج، عندما اجتمع الفريق كله فى كاليفورنيا فى ١٩٥٦ - وكان فولر قد عاد إلى مكانه فى كالتيك، وكان هويل فى زيارة أخرى قصيرة له قادمًا من إنجلترا، وكان الزوجان بوربيدج قد أصبحا أخيراً فى حالة تنقلات مستمرة، دفعهما إليها أبحاثهما مع فولر فى كمبردج.

وكان العمل الذى أنجزه الفريق فى كاليفورنيا فى ١٩٥٦ مجهوداً مشتركًا تماماً، وعندما نُشرت ثمرة أعمالهم فى بحث علمى ضخم فى ١٩٥٧، فى عدد أكتوبر من مجلة "متابعة الفيزياء الحديثة" وردت أسماء الباحثين بشكل ديمقراطى تبعًا لتسلسل الأحرف الأبجدية، بوربيدج ثم بوربيدج ثم فولر ثم هويل. وعُرف البحث بالأحرف الأولى ب٢ ف هـ، ومازال حدث تاريخى مشهور فى مجال الفيزياء، وليس الفيزياء الفلكية وحدها (٥٧) . وأتذكر أول مرة أمسكت فيها نسخة من هذا البحث فى يدى، فى خريف ١٩٦٦، وعرفت أن الموضوع الذى يعالجه هو توضيح أصل العناصر الكيميائية، بما فيها العناصر الموجودة فى جسمى، بأنها كانت لحظة شعرت فيها بالقشعريرة. وإذا

(٥٦) كان من الواجب أن يتلقى اعترافًا بقيمة عمله فى ذلك الزمن، غير أنه كان يعمل لمؤسسة الطاقة الذرية الكندية، وبسبب التكتم الذى ساد فى زمن الحرب الباردة نُشرت نتائجه الأكثر أهمية لأول مرة فى تقرير تصنيفى حسب درجة السرية لا يُسمح بالاطلاع عليه سوى لقلة من الناس.

(٥٧) يشير الترتيب الديمقراطى للأسماء تبعًا للأبجدية أنها وردت فى الواقع بعكس ترتيب انضمام أصحابها إلى المشروع - هويل هو الذى بدأ المشروع ثم ضم فولر الذى أدخل الزوجان بوربيدج فى مجال المشروع.

كان هناك أى عمل فى الفيزياء يستحق عن جدارة الحصول على جائزة نوبل، فإنه بحث ب^2 ف هـ. لكن هذا ما سنحكيه فوراً.

يسلب كثير من القيود والطقوس الغريبة فعالية مؤسسة نوبل، وبالمناسبة أيضًا يضاف الغباء إلى ذلك. وأحد القواعد العجيبة أنه لا يمكن لأكثر من ثلاثة أشخاص المشاركة فى الحصول على جائزة واحدة لجزء واحد من البحث، وهو ما لا يتفق حتى مع أفضل مداولات الحكم العالية لتمحيص هذا البحث. لكن الجميع خارج ستوكهولم - بما فيهم ويلى فولر - أصيبوا بدهشة بالغة عندما أعطيت الجائزة للبحث حول عملية التركيب النووى فى النجوم لفولر نفسه، وحده دون الفريق، فى ١٩٨٣ ، وكما عبر جيوفرى بوربيدج فى نعى لفولر نُشر فى "المجلة الفصلية للجمعية الفلكية الملكية"، "أدى تفرد فولر بالجائزة دون الآخرين إلى وجود بعض التوتر بين ب^2 ف هـ، فلقد كنا مدركين جميعًا أن البحث كان جهد فريق وأن فريد هويل أنجز عملاً مبتكراً" وإذا كان لا مهرب من انفراد شخص بالجائزة تبعًا لقواعد المؤسسة، فإنه هويل بالتأكيد. فلماذا تم التغاضى عنه؟ هناك سببان محتملان، ويبدو كلاهما مقبول تبعًا لوجهة نظر سجل مسلك لجنة نوبل. ويعتقد هويل من جانبه بأن الأمر كان عقابا : لأنه تهور عندما انتقد إعطاء جائزة نوبل ١٩٧٤ فى الفيزياء لعالم الفلك الراديوى أنتونى هيويش، خاصة لاكتشافه النابضات. وكان الذى اكتشف النابضات بالفعل هى جوسيلين بيل بارنيل، وكان اسمها فى ذلك الوقت جوسيلين بيل، طالبة دراسات عليا كانت تعمل تحت إشراف هيويش. ورغم أن هيويش استأنف البحث وواصل حل مشكلة النابض، لم يكن هويل هو الوحيد الذى قال، فى ١٩٧٤، إنه من الغريب إلى حد ما ألا يحصل الشخص الذى أنجز الاكتشاف بنصيب فى الجائزة. ومن المحتمل أنه عانى من توابع هذا الانتقاد بعد سبع سنوات تالية، عندما حصل فولر على جائزته. والاعتراض الثانى ضد لجنة نوبل بأنه كان يجب عليها أن تعطى الجائزة لهويل إنه فى السبعينيات كان قد أصبح مهتمًا بأصل الحياة، ونشر عدة أبحاث توصل خلالها إلى أن الحياة قد تكون متطورة فى الفضاء وأن أمراضًا مثل الإنفلونزا قد تكون أتت إلى الأرض بواسطة مذنبات. ويُنظر إلى هذه الأفكار عادة على أنها غريبة ولا تتسق بالتأكيد مع الاتجاه السائد فى المجال العلمى، رغم أنها قائمة على افتراضات تستحق على الأقل إجراء

اختيارات عليها. وقد يعود الأمر إلى أن لجنة نوبل لم تكن تريد أن تضفى احتراماً على ما ترى أنه أفكار غريبة بإعطاء الجائزة لهويل - فإذا كان الأمر كذلك فلا بد من استخراج درس ثمين مما حدث لفرانسيس كريك الذى اقتسم جائزة نوبل ١٩٦٢ للفيزيولوجى والطب مع جيمس واطسون وموريس ولكينز بالنسبة لاكتشاف بنية الدنا، ثم طور بعد ذلك أفكاره غير المناسبة حول الحياة والكون، ليس فقط فى التولد الأحيائى (٥٨) ولكن أيضًا التوسعات فى هذا الموضوع محاكاة لبعض أفكار هويل، وهذا ما نشره لاحقًا خلال حياته، بعد أن أصبحت الجائزة مضمونة التحقق.

لكن العلم لا يدور كله حول الجوائز والمكافآت، ولا يؤثر كل ذلك على حكاية المصدر الذى جئنا منه. وأهم ما فى موضوع ب٢ ف هـ أنه يفسر الوفرة النسبية للعناصر بتفاصيل واسعة تمامًا، باستخدام حسابات دقيقة تتضمن الأسر المستعرض للنيوترون، وعملية ألفا... إلخ. وسوف أقدم هنا مخططًا للأطر العامة التى توضح كيف أنجزوا ذلك، ولكن من المهم تقدير أنه لم يكن مجرد تخمين مبهم، ألم يكن جامو هو القائل: "حسنًا إذا كان الهيدروجين والهليوم انبثقا عن الانفجار العظيم، فلا بد أن كل شىء نتج داخل النجوم". وهذا يدل بمنتهى الدقة على كيفية إنتاج كل شىء آخر (وهو فى الحقيقة الكربون وكل شىء أكثر ثقلاً من الكربون) داخل النجوم.

وهناك ثلاث خطوات رئيسية فى هذه العملية، إضافة إلى بعض العمل التأسيسى الذى قدم فولر من خلاله البحث المميز حول العمليات التى يمكن للهيدروجين من خلالها التحول إلى هليوم داخل النجوم، وبذلك أكد نهائيًا بأنه لا يمكن إنتاج أكثر من ٢٠ فى المائة (أو حتى أقل من ذلك) من الهليوم الموجود فى الكون بهذه الطريقة. والخطوة الأولى عملية ألفا، وتنويعات فى الموضوع نفسه، التى يتم من خلالها توليد الطاقة داخل النجوم بإضافة جسيمات ألفا إلى النوى الموجودة من قبل. وتنتج ثلاثة جسيمات ألفا نواة كربون - ١٢. فإذا أضفت جسيم آخر تحصل على أكسجين - ١٦، وينتج عن إضافة جسيم آخر نيون - ٢٠، وهكذا. ومن الواضح، حتى لو لم نلجأ إلى حسابات تفصيلية، أن هذه العملية عبارة عن سلاسل أساسية من التفاعلات التى تجرى داخل

(٥٨) التولد الأحيائى panspermia : عمومية أو تعممية الجراثيم أو انتشاريتها (المترجم)

النجوم، لأن أغلب العناصر الشائعة (باستثناء الهيدروجين والهليوم) هى فقط تلك التى يتم إنتاجها بواسطة عملية ألفا _الأكسجين والكربون والنتروجين والسليكون والمغنسيوم والنيون والحديد (وسوف أوضح ما يحدث بمزيد من التفصيل فى الفصل القادم). وأهم ما فى هذه العملية، كما أشرت من قبل، أن كل خطوة تالية تحدث عند درجة حرارة أعلى من السابقة، لأن النوى الأكثر ثقلاً تحتوى على مزيد من البروتونات، وبذلك تكون لها شحنة موجبة أكبر، تصد بقوة أشد جسيمات ألفا موجبة الشحنة التى تقترب منها. وحتى بمساعدة الظاهرة النفقية، يجب على جسيم ألفا أن يتحرك بسرعة أعلى ليخترق نواة الكربون، التى تحتوى على ستة بروتينات.

وتحدث هذه العمليات جميعًا طوال الوقت، ولدى النوى فرصة أيضًا (الكثير من الفرص) لامتصاص نيوترون بعملية س، والتحلل وامتصاص نيوترون آخر، وهكذا. وتأتى النيوترونات التى تدفع عملية س فى الواقع من كربون - ١٣، كما قال كاميرون، ولكن قد يصاحبها تفاعلات مماثلة تتضمن أسر ألفا بنظائر أكسجين - ١٧، ونيون - ٢١).

وهذا هو سبب أن كثيراً من العناصر التى ليس لها نوى مصنوعة فى مجملها من جسيمات ألفا يتم إنتاجها داخل النجوم. ولا يسرى ذلك على نوى الحديد - ٥٦ والنيكل - ٥٦. وتحتوى نوى حديد - ٥٦ على ٢٦ بروتونًا و٣٠ نيوترونًا، بينما تحتوى نوى نيكل - ٥٦ على ٢٨ بروتونًا و٢٨ نيوترونا، وما يحدث فعلاً أن ١٤ جسيم ألفا تندمج معًا. من جانب آخر فإن اندماج النوى الأخف إلى نوى أكثر ثقلاً يطلق طاقة (انظر شكل ٧ - ١). والسبب من الناحية الأساسية أنه أصبح هناك الآن مزيداً من الشحنة الموجبة فى النواة (وبالنسبة للنوى الأكثر ثقلاً من اليورانيوم، تتغلب الشحنة الموجبة فى النهاية على القوى النووية الشديدة وتفجر كل شىء بعيداً عن بعضه البعض).

وحيث إن الكثير من العناصر الأكثر ثقلاً من الحديد والنيكل توجد فى الطبيعة (حتى لو كان ذلك بكميات صغيرة فقط نسبياً)، كان هويل وزملاؤه على علم منذ البداية أنه لا بد من وجود عملية طبيعية تنتج هذه العناصر فى داخل النجوم. والطريقة الواضحة لحدوث ذلك أن يتم بالنيوترونات، التى لا تضع اعتباراً للشحنة الموجبة التى

تقترب منها. ولكن إذا تتابعت عمليات أسر النيوترونات ببطئ، فقد تتحلل هذه العناصر الثقيلة، في كثير من الحالات، قبل أن تتمكن من أسر ما يكفى من النيوترونات لإنتاج نوى ثقيلة حقًا مستقرة لعناصر مثل الذهب والرصاص. ولا بد من وجود عملية أسر نيوترون سريعة (ويطلق عليها، بالطبع، عملية ر) حيث يكتسح خلالها فيضان من النيوترونات النوى، حتى تتمكن نواة مفردة من امتصاص عدد كبير منها قبل أن تكون لديها فرصة التحلل. وكان الإسهام الرئيسى لهويل فى التعاون بين فريق ب[٢]ف ه (بالإضافة إلى تقديم الإنطلاقة الأصلية للعمل) أنه حسب عملية ر بكل جوانبها، للتأكد مما إذا كانت عمليات أسر النيوترونات والتحللات الإشعاعية التابعة تنتج بالفعل مظاهر الوفرة المرصودة للعناصر. وخلال كل ذلك، كان الفريق يرى أن فيض النيوترونات المطلوب لإنجاز هذا العمل أتى من انفجار نجم ضخم مثل السوبرنوفا فى نهاية حياته. وكان هذا المدخل ناجح تمامًا إلى درجة أنه فى الحالات النادرة عندما كان يتضح أن الوفرة التى حسبوها لأحد العناصر تختلف عن تلك المنشورة فى المطبوعات العلمية حول الوفرة الفعلية لهذا العنصر، أن يكتشفوا أن القيمة المنشورة خاطئة. ومن جانب ما فإن نجاح هذا العمل "تنبأ" بوجود السوبرنوفا، حيث لم يكن هناك تفسير آخر لمصدر النيوترونات المطلوبة لعملية ر.

ورغم أن كل فرد فى الفريق أنجز مساهمات فى كل جوانب العمل، وأن الأعضاء الباقين على الحياة لديهم الأمانة لتأكيد ذلك (خاصة أثر الإخفاق التام لنوبل)، كان لدى كل منهم مجالات خبرته الخاصة، كان عمل هويل المراجعة الشاملة لتحول الهيدروجين إلى هليوم، وهويل العمل النظرى، تدعمه ملاحظات الرصد للزوجين بوربيدج (وكان لجيوفرى بوربيدج قدم فى كلا المعسكرين)، التى توضح ظواهر الوفرة المرصودة لكل شيء من الكربون فى اتجاه اليورانيوم وما بعده (وأوضحت معلومات من اختبارات القنبلة النووية، وبإعادة تصنيف هذه المعلومات خلال زمن إجراء الأبحاث، أن العناصر غير المستقرة ذات النشاط الإشعاعي حتى الأكثر ثقلاً من اليورانيوم تم تشكيلها فى الانفجارات النووية، مما يعطى مؤشراً قوياً على ما يمكن أن تفعله العملية ر). وكانت الفجوتان الوحيدتان فى مشروعهم تتعلق إحداهما بالكمية الضخمة من الهليوم التى لم تُنتج فى النجوم، لكنها ظهرت فى الانفجار العظيم (وهى فجوة تم سدها بأعمال هويل

وتايلور فى ١٩٦٤)، وفجوة أصل الديوتريوم (الهيدروجين الثقيل)، إضافة إلى الليثيوم والبيريليوم والبورون (وهى عناصر خفيفة نادرة لها على الترتيب ثلاثة بروتونات وأربعة وخمسة فى النوى). وتم تفسير تشكيل هذه العناصر الخفيفة فى الانفجار العظيم بنجاح بواسطة فاجونر وفولر وهويل فى ١٩٦٧، كما شرحت فى الفصل السابق. وبتمهيد هذه الأرض الراسخة للفيزياء النووية وعلم الفلك، يمكننا الآن القفز إلى الأمام إلى أفضل فهم حديث لكيفية حدوث النشاط الفيزيائى داخل النجوم لإنتاج العناصر وبعثرتها فى الفضاء.

الفصل الثامن

رابطة النجم الفائق

لم يُقدر للشمس أن تلعب دوراً رئيسياً فى بذر المجرة بالعناصر الثقيلة. ورغم ذلك فإنها تعتبر نجماً ضخماً نسبياً، من حيث إن ٩٠ فى المائة على الأقل من كل النجوم أقل ضخامة من الشمس، لكنها تظل غير ضخمة بما يكفى لطبخ أى شىء أكثر ثقلاً من الكربون والأكسجين والقليل من النتروجين خلال عمرها كله. وللحصول على ما هو أكثر من ذلك يجب أن يبدأ النجم بكتلة أربعة أضعاف كتلة الشمس على الأقل. ولكى تُنتج كل العناصر الثقيلة يجب ألا تقل كتلته عن ٨ إلى ١٠ أضعاف كتلة الشمس. وتظل الكربون والنتروجين والأكسجين عناصر بالغة الأهمية، كما رأينا، ولا يجب أن نتجاهل النجوم الأقل ضخامة التى تُنتج الكثير من هذه المواد. ومع ذلك لا تستطيع الشمس إطلاق الكثير من المادة التى تُنتجها إلى الكون الكبير، والنجوم المشابهة تماماً للشمس لكنها تتواجد فى مواقع مختلفة يمكنها أن تُنتج عناصر أكثر ثقل بكثير، الأثقل فالأثقل حتى الحديد، وأن تطلق جزء لا بأس به من هذه المادة المصنعة إلى فضاء ما بين النجوم.

ويعتمد العمر الذى يقضيه نجم ما فى التتالى الرئيسى على كتلته - نحو ١٠ مليارات السنوات بالنسبة للشمس، و٥٠٠ مليون سنة بالنسبة للنجوم البالغ كتلة كل منها ٣ أضعاف كتلة الشمس، و٢٠٠ مليار سنة للنجم الذى تبلغ كتلته نصف كتلة الشمس. وأيًا كان حجم النجم، فإنه يولِّد خلال وجوده فى التتالى الرئيسى حرارة عن طريق تحويل الهيدروجين إلى هليوم بالطريقة نفسها التى سبق شرحها. وعندما يستخدم نجم له كتلة الشمس تقريباً كل الهيدروجين الموجود فى قلبه بهذه الطريقة،

فإن القلب نفسه ينهار ببطء تحت تأثير وزنه الخاص. ويؤدى هذا الأمر إلى نتيجتين، الأولى أنه يجعل القلب نفسه أكثر سخونة، حيث يتم إطلاق طاقة جاذبية. والثانية أن الهيدرجين خارج القلب ينجذب إلى الداخل فى اتجاه القلب، الذى يعتبر ساخنًا بما يكفى للهيدروجين "الجديد" لكى يبدأ فى الاحتراق لإنتاج هليوم، بدورة الكربون نتروجين أكسجين CNO، فى قشرة حول القلب، وتؤدى هذه الحرارة التى تسرى فى اتجاه خارج من القلب إلى تمدد الطبقات الخارجية للنجم، فيصبح عملاقًا أحمر. وتعتبر عملية الكربون النتروجين الأكسجين هذه مهمة بشكل خاص لأنها تعتبر، بالإضافة إلى توليد الحرارة، مصدراً للنتروجين فى الكون. ومع تطور تفاعلات هذه الدورة فإنها تحرف توازن الخليط الكيميائى فى القشرة المحيطة بقلب النجم من الكربون والأكسجين تجاه النتروجين.

وخلال هذا الذى يحدث فى القشرة المحيطة بالقلب، فإن القلب نفسه يتقلص – إلى أبعد حد ممكن. وهناك حد لدى اقتراب النوى من بعضها البعض، وعندما تصل النوى إلى هذه الحالة (والتى تحددها قوانين الفيزياء الكمية) يُقال إن النوى "تتحلل". ولإعطاء فكرة عن الكثافات الموجودة علينا أن نعرف أن كل الشمس، التى تصل كتلتها إلى ٣٣٠٠٠٠ ضعف كتلة الأرض، لو وصلت إلى حالة المادة النووية المتحللة فإنها تكون تقريبًا فى حجم الأرض. وتبدأ عملية ألفا الثلاثية فى النشاط فى قلب نجم مثل الشمس عندما يصبح قلبه كتلة متحللة من نوى الهليوم، وتصل درجة حرارته إلى نحو ١٠٠ مليون درجة. وبالنسبة للشمس نفسها فإن هذا الأمر سيحدث بعد نحو ٢٥٠ مليون سنة من توقف عملية احتراق الهيدروجين فى قلبها وتبدأ فى التحول إلى عملاق أحمر. لكن عندما يبدأ الهليوم فى الاحتراق، فإن ذلك يحدث فى نجم له كتلة الشمس نفسها على هيئة وهج يؤثر على كل تحلل القلب [٥٩]. وتؤدى الحرارة المتولدة فى وهج الهليوم، الذى يحدث بسرعة انفجار قنبلة، إلى تمدد القلب وتحوله من حالة التحلل

(٥٩) تستغرق هذه التحولات فى بنية النجم عند هذه المرحلة من حياته أكثر بقليل من دقيقة. وعندما طوّر علماء الفلك فى الستينيات والسبعينيات، برامج كمبيوتر لحساب كيفية حدوث هذه التغيرات، فإن تشغيل البرامج استغرق زمنًا أطول بكثير مما يحدث للنجم عندما تتغير بنيته.

وعودته إلى ما يشبه القلب الداخلى العميق لنجم مثل الشمس، لكنه يكون ذو حرارة وكثافة وضغطًا أكثر ارتفاعًا. ويطلق ذلك أيضًا كمية كبيرة من المادة –قد تتراوح بين ٢٥ و٣٠ فى المائة من الكتلة الأساسية للنجم، إلى الفضاء، من تلك المادة الموجودة فى المناطق الخارجية للنجم. وبالنسبة للنجوم التى تكون كتلتها ضعف كتلة الشمس على الأقل، فإن احتراق الهليوم يحدث بطريقة أكثر تدرجًا، لكن النتيجة النهائية تتشابه إلى حد بعيد.

وفى بداية مرحلة حياة النجم كعملاق أحمر، فإن نجمًا مثل الشمس سيكون نصف كتلته (الذى لم يتحلل بعد) فى القلب الهليوم، ويتألق بسطوع أكثر مائة مرة مما هى عليه الشمس فى وقتنا الراهن. لكن طبقاته الخارجية تكون قد تمددت وتحولت إلى غلاف غازى بالغ الضخامة، وقد تضخمت بسبب الحرارة أسفلها، حتى تصبح كمية الطاقة التى تعبر كل متر مربع من السطح منخفضة تمامًا، ويبرد السطح ويصبح أحمر اللون. وعندما تصل الشمس إلى مرحلة العملاق الأحمر تكون قد تمددت إلى درجة كبيرة حتى يصبح قطرها أكبر من مدار عطارد، لكنها تكون قد فقدت ربع كتلتها الأصلية على الأقل بعد إطلاق مادة طبقاتها الخارجية إلى الفضاء.

ورغم ذلك لا يستمر هذا الطور من حياة النجم طويلاً، لأن احتراق الهليوم يعطى طاقة أقل بكثير من احتراق الهيدروجين. والطاقة الكلية التى تنطلق عندما يندمج ثلاثة جسيمات ألفا لتكوين نواة كربون – ١٢ تكون ١٠ فى المائة فقط من طاقة الانطلاق عند إنتاج نواة هليوم –٤ (جسيم ألفا) من أربعة بروتونات (نوى هيدروجين)، لذلك فإن الهليوم يحترق بسرعة أعلى بكثير من الهيدروجين لمجرد الوصول إلى سطوع النجم، فما بالك بالمحافظة على تألقه بسطوع أعلى من ذلك بمئات المرات. وبالفعل يستمر احتراق الهليوم فى نجم كتلته مثل كتلة الشمس إلى نحو ١٥٠ مليون سنة فقط. وبينما يكون النجم فى هذه الحالة فإنها يحصل على طاقته من مصدرين – احتراق الهليوم فى القلب، واستمرار احتراق الهيدروجين فى الغلاف الرقيق حول القلب.

ومرة أخرى لن يكون التأثير الكلى لهذا النشاط على المظهر الخارجى للنجم كما هو متوقع – ففى هذه المرة، بدلاً من مزيد من التمدد بعد وهج الهليوم، تتقلص الطبقات الخارجية للنجم قليلاً، ويهبط سطوعه إلى نحو عشر ما كان عليه قبل وهج الهليوم،

ويحدث ذلك بسبب أن القلب الهليوم الداخلى للنجم يكون قد تمدد، مما يقلل من المنطقة المتاحة لاحتراق الهيدروجين حول القلب، بذلك تصبح عملية إنتاج الطاقة هذه، رغم استمرار نشاطها، أقل تأثيراً مقارنة بما قبل حدوث وهج الهليوم. لكن هذا أمر منطقى على الأقل ، عندما يتقلص القلب، تتمدد الطبقات الخارجية، وعندما يتمدد القلب تتقلص الطبقات الخارجية.

ولا يُنتج احتراق الهليوم فى القلب الكربون فقط، لأنه فى مثل هذه الأحوال تتفاعل نوى الكربون مباشرة بالطبع مع جسيمات ألفا لإنتاج نوى أكسجين، الذى يساعد على تأخير مصير النجم، لذلك يكون "الرماد" الناتج عن احتراق الهليوم مزيج من الكربون والأكسجين. لكن هذه نهاية مسار نجم بدأ بكتلة تقترب من كتلة الشمس. وفى نهاية الأمر يكون كل الهليوم فى القلب قد تم استخدامه بهذه الطريقة، فيستقر النجم ككرة باردة من المادة المتحللة، لأنه لا يحصل أبداً على حرارة كافية فى قلبه للانطلاق إلى مزيد من مراحل الاحتراق النووى. وخلال الفترة الأخيرة من حياة النجم فإن الأمر يصل حتى إلى إطلاق مزيد من مادته الموجودة فى جوه الخارجى الرقيق، وينفجر متناثراً فى الفضاء، والنفاية التى تتركها الشمس نفسها ستكون قزماً أبيض كتلته لا تتجاوز نصف الكتلة الأصلية للشمس.

وبالنسبة لكثير من النجوم التى تتراوح كتلتها بين ضعف وأربعة أضعاف كتلة الشمس، تنفجر الطبقات الخارجية بعيداً كلها تقريباً على هيئة قشرة من المادة المبثوثة حول مركز النجم لتتمدد مبتعدة عنه. ويمكن رؤية هذه القشور كلما استمر مركز النجم ساطعًا لإضاءتها. ويُطلق عليها اسم السدم الكوكبية، لأنه فى بداية رصدها بالتلسكوبات الصغيرة كان مظهرها شبه الدائرى يجعلها تشبه الكواكب ولو بشكل تقريبى.

وتبعًا لحسابات علماء الفلك تعيد السدم الكوكبية فى المجرة تدوير نحو ٥ كتل شمسية فى المتوسط من المادة النجمية إلى فضاء ما بين النجوم سنوياً، مما يمثل نحو ١٥ فى المائة من المواد التى تُطلقها النجوم، وتصبح متاحة لإعادة تدويرها على هيئة نجوم جديدة. ومعظم هذه المادة يكون بالطبع هيدروجين وهليوم (خاصة بالنسبة للنجوم التى يزيد حجمها قليلاً عن الشمس)، لكن يحدث فى بعض الحالات أن تختلط

العناصر الأكثر ثقلاً الناتجة عن عمليات الاحتراق النووى بالطبقات الخارجية للنجوم قبل إطلاقها. وهذه هى إحدى الطرائق لوصول الأكسجين والكربون والنتروجين إلى الوسط ما بين النجوم بعد إنتاجها داخل النجوم. وفى الحقيقة تعتبر عملية إطلاق كتلة من النجوم ذات الكتل المنخفضة ذات أهمية خاصة كمصدر للنتروجين الذى يعتبر منتجًا جانبيًا لدورة الكربون – النتروجين – الاكسجين، رغم أن بعض الكربون والاكسجين يتم تكوينه بطرائق أخرى، كما سنرى، فإن هذه العملية الذى ذكرناها توًا نفترض أنها المصدر الوحيد للنتروجين فى الكون. يمكنك الاطمئنان تمامًا إلى أن كل النتروجين فى الهواء الذى تتنفسه وفى الدنا الموجود فى خلاياك (وكذلك أغلب الكربون فى جسمك) كان له وجود سابق كجزء من سديم كوكبى أو أكثر من سديم، المنطلق من النجوم العمالقة الحمراء.

وبعد هذه المرحلة من النشاط، بالغة الأهمية لظهور الحياة التى نعرفها، يصل العملاق الاحمر إلى نهاية حياته إذا كان قد بدأها بمجرد بضع كتل شمسية. ثم يستقر القلب المتبقى من النجم، وهو عبارة عن كرة متحللة من الكربون والاكسجين، بالتدريج على هيئة قزم أبيض يخبو شيئاً فشيئاً إلى شىء ضئيل (وبالفعل فإن النجوم الأقل من نصف كتلة الشمس لا تصل سخونتها الداخلية أبداً إلى ما يكفى لكى تصل إلى حرق الهليوم، وتنتهى إلى كرات من مادة الهليوم المتحلل). وعلى الأقل يستقر النجم على هيئة قزم أبيض وتكون الكتلة الكلية لما تبقى منها بعد إطلاق طبقاته الخارجية أقل من ١,٤ كتلة شمسية. وبالنسبة لأى جرم أكثر ضخامة من ذلك، فمن المحتم حدوث مرحلة أخرى من التقلص، كما سنرى. ويمكننا أن نقول بشكل تقريبى إن إطلاق العملاق الأحمر لكتلة كبيرة من الغاز خلال حياته، يجعله يقضى بقية عمره كقزم أبيض وهو مصير كل النجوم المعزولة التى تبدأ حياتها بكتلة أقل من نحو ٤ كتل شمسية.

ويبقى النجم الذى تصل كتلته إلى نحو ٤ كتل شمسية القليل فقط خلال ٦٠٠ مليون سنة فى التتالى الرئيسى، ثم يقضى المراحل اللاحقة من حياته بسرعة أعلى أيضاً. وبشكل تقريبى تمامًا فإن العمر الكلى الذى يقضيه النجم كعملاق أحمر (قبل وخلال احتراق الهليوم) يكون حوالى ١٠ فى المائة من العمر الذى يقضيه كنجم فى التتالى الرئيسى. ورغم أن النجوم التى تتراوح كتلها بين ٤ و٨ أمثال كتلة الشمس، قد

تكون أعمارها أقصر مقارنة بالشمس، لكنها تنهي حياتها بطريقة أكثر إثارة، مما يثرى من مادة المجرة. قد تظن أنه بمجرد تحول كل الهليوم في قلب النجم إلى كربون وأكسجين، فإن النجم الأكثر ضخامة من الشمس يتقلص مرة أخرى إلى الداخل، مطلقًا طاقة جاذبية وترتفع درجة الحرارة داخله حتى يصبح من الممكن توليد طاقة باندماج نوى الكربون والأكسجين لإنتاج عناصر حتى الأكثر ثقلاً. لكن إذا لم يكن للنجم مادة تتراوح كتلتها بين ٨ و١٠ كتلة شمسية حتى يمكنه المحافظة على كل ما في داخله متماسكًا، فإن الأمور لن تكون بهذه البساطة.

وأكثر العوامل أهمية هو أنه حتى في نهاية حياة العملاق الأحمر، فإن ما يتبقى من هذا النجم (وهو ما لا يحدث للشمس) يظل أكثر من نحو ١,٤ كتلة شمسية في قلبه السابق، بعد أن يكون كل ما في غلافه من الهيدروجين والهليوم (إضافة إلى أجزاء صغيرة من أشياء أخرى مثل الكربون والنتروجين والأكسجين) قد تناثر بعيداً عنه. وهذا أمر مهم لأن للقوة حدود حتى بالنسبة للمادة المتحللة. فإذا كان للبقايا النجمية القزم الأبيض كتلة أكبر من ١,٤ كتلة شمسية (وهي قيمة يطلق عليها حد شاندراسيكار، تبعًا لعالم الفيزياء الفلكية الذي أجرى حسابات هذه الظاهرة للمرة الأولى)، فإن الجاذبية تتغلب على قوى نظرية الكم التي تجعل تحلل المادة صعبًا، وتنهار بقايا النجم بسرعة على نفسها، مما يُطلق بسرعة كمية ضخمة من الحرارة تنتج عنها نوبة هائجة من الاندماج النووي.

وفي المراحل الأخيرة من الحياة النشطة لمثل هذا النجم، تكون عملية التركيب النووي أكثر تعقيداً من إضافة جسيم ألفا التي تنقلنا من الهليوم إلى الأكسجين. وفي حالة "حرق" الكربون تتحد نوى الكربون ببعضها البعض بطرائق مختلفة، وتُطلق جسيمات متنوعة في هذه العملية. ويمكن لنواتي كربون – ١٢ أن تندمجا لإنتاج نواة واحدة من نيون – ٢٠، مع بقاء جسيم ألفا، أو تندمجا لإنتاج صوديوم – ٢٣، مع إطلاق بروتون، أو تتحدا لإنتاج ماغنسيوم – ٢٣، مع إطلاق نيوترون. وهذا هو مصدر ما نراه من النيون في حالة الإضاءة بالنيون، والصوديوم في الملح الشائع، والمغنسيوم عند استخدامه (بشكل سليم) في الألعاب النارية – احتراق الكربون داخل النجوم. وكما تُطلق هذه التفاعلات الطاقة (وتكون هناك في الواقع طاقة أكثر بقليل بالنسبة لكل

عملية تفاعل مقارنة بالطاقة المنطلقة عند تكوين نواة كربون – ١٢ واحدة بتفاعل ألفا الثلاثي)، فإن هذه التفاعلات تنتج كل أنواع الجسيمات اللازمة للتفاعل مع النوى الأخرى، مثل تلك الخاصة بالأكسجين، لزيادة تنوع العناصر الموجودة. وفي الشروط المتطرفة التي توجد في قلب هذا العملاق الأحمر (وهو بالفعل قزم أبيض متحلل)، فإن ذلك يُنتج سلسلة من التفاعلات النووية لا حدود لها تمهد الطريق أمام نيكل – ٥٦ ، الذي يتحلل لإنتاج الحديد – ٥٦. وبالنسبة لنجم تتراوح كتلته بين ٦ و٨ كتلة شمسية وهذا محتمل حتى بالنسبة للنجوم الأقل ضخامة بقليل ، فإن قوة انفجار عملية التركيب النووي تُمزق النجم، وتبعثر كتلته كلها، على هيئة عناصر ثقيلة، في فضاء ما بين النجوم. وقد تصل كمية الحديد المنتشر عبر المجرة في انفجار واحد من هذا النوع إلى أكثر من نصف كتلة شمسية، ونحو ربع كتلة شمسية من الأكسجين الناتج من الانفجار، وكميات أقل من العناصر الأخرى. وكان أول من اقترح هذا السيناريو عن التفتت الكامل للنجم المتحلل في سوبرنوفا ناتج عن الاحتراق الانفجاري للكربون ريد هويل وويلي فولر في ١٩٦٠، لكن هذا السيناريو شهد تطورات مهمة منذ ذلك الحين، من خلال الجمع المعتاد بين النماذج النظرية المتطورة (المعتمدة على عمليات أفضل للأسر النووي المستعرض إضافة إلى عمليات المحاكاة المتطور بواسطة الكمبيوتر) وعمليات الرصد الواقعية للسوبرنوفا. واتضح – كما سنرى – أنه رغم إمكانية تمزق النجم المنعزل الذي تصل كتلته إلى نحو ٨ كتل شمسية بهذه الطريقة، يمكن أن يكون هذا النوع نفسه من التمزق هو مصير نجوم أقل ضخامة أعضاء في المنظومات الثنائية. وقبل أن نغوص في التفاصيل، سنحاول تقديم بعض الأفكار حول مدى ضخامة ما يمثله انفجار السوبرنوفا.

من اسم السوبرنوفا قد تظن أن هذ النجم يشبه النوفا (النجم الجديد) لكنه أكثر ضخامة فقط. هذا صحيح من أحد الجوانب . لكنه مثل القول بأن القنبلة الهيدروجينية بشبه الألعاب النارية، لكنها أكثر ضخامة. ولقد أخذت نجوم النوفا (النجوم الجديدة) اسمها من أنها بدت لعلماء الفلك في الأزمنة القديمة نجوماً "جديدة" انبثقت فجأة إلى الوجود. لكننا نعرف الآن بالفعل أن نجوم النوفا هي انفجارات مؤقتة لنجوم أكثر خفوتاً، التي يمكن رؤيتها عادة باستخدام التلسكوبات، وليست جديدة البتة. وفي

انفجار النوفا العادى يسطع النجم بنحو ١٠٠٠٠٠ ضعف فى عدة أيام، ثم يعود إلى الخفوت إلى مستواه السابق خلال عدة أشهر. ويظهر فى مجرة عادية مثل مجرتنا نحو ٢٥ نجم نوفا كل سنة. وهى تحدث فى المنظومات الثنائية عندما يكون هناك قزم أبيض بكتلة أدنى من حد شاندراسيكار على مدار حول عملاق أحمر. وتنجذب مادة الطبقات الخارجية الرقيقة للعملاق الأحمر بجاذبية القزم الأبيض وتسقط على سطحه، بمعدل نحو جزء من مليار كتلة شمسية سنوياً. وهناك يصبح مزيج الهيدروجين والهليوم من العملاق الأحمر طبقة على سطح القزم الأبيض حتى يزداد ضغط الجزء السفلى من الطبقة إلى درجة تؤدى إلى انفجار تفاعلات نووية، تسبب تفجيراً للمادة وتناثرها فى الفضاء خلال تبدد النجم. ويمكن للعملية بأكملها أن تتكرر من بدايتها.

وبينما يبدو انطلاق الطاقة فى النوفا أمراً مثيراً بالمقاييس البشرية، فإنه يُعتبر حبة فستق مقارنة بالسوبرنوفا، الذى يطلق طاقة أكثر من طاقة النوفا بمليون مرة، ويسطع فترة موجزة بشدة سطوع كل النجوم فى مجرة مثل مجرة درب اللبّانة إذا اجتمعت معا. وبالفعل، تسطع السوبرنوفا، لعدة أسابيع، بشدة ١٠٠ مليار شمس. والسوبرنوفا أكثر ندرة بكثير مقارنة بالنوفا – رأى تيشو براه واحد منها فى مجرتنا عام ١٥٧٢، ورأى جوهانس كبلر واحد آخر بعد ٣٢ سنة فقط، فى ١٦٠٥، ولم ير أحد بعد ذلك أى منها، إلا أنه تم رصد سوبرنوفا فى ١٩٨٧ فى سحابة مجلان الكبرى، وهى مجرة قريبة من مجرتنا.

والسوبرنوفا نادرة حقًا حتى إن علماء الفلك بدأوا يعرفون طبيعتها الحقيقية فى منتصف العشرينيات فقط، عندما بدأوا لأول مرة يدركون مدى اتساع الكون. وحتى ذلك الوقت، كان من الممكن القول بأن المنظومة التى نطلق عليها الآن درب اللبّانة، قرص النجوم المسطح الممتد لنحو ١٠٠٠٠٠ ألف سنة ضوئية ويحتوى على بضع مئات مليارات النجوم، هو كل الكون. وكان قد تم رصد بقع غائمة فى السماء، يطلق عليها السدم، قبل ذلك بوقت طويل، لكن أحداً لم يستطع أن يقرر بوضوح فى بداية القرن التاسع عشر ما إذا كانت هذه البقع الباهتة سحب من المادة داخل درب اللبّانة، أو منظومات صغيرة نسبياً من النجوم (مثل حشود النجوم) فى مدار حول درب اللبّانة، أو (وهو أبعد الاحتمالات) مجرات كاملة من النجوم، مثل درب اللبّانة، لكنها بعيدة جداً عنا لدرجة عدم تمييز نجوم بمفردها حتى بأفضل التلسكوبات المتاحة.

واختلط الجدل باكتشاف ما بدا أنه نوفا عادى فى أحد السدم الباهتة (أطلق عليه حينئذ سديم أندروميدا) فى ١٨٨٥ وتمت دراسة "النوفا" وتصويرها فوتوغرافياً. لكن لم تكن هناك طريقة فى ذلك الوقت لتقدير مسافة ابتعاده عنا. ثم شُوهد بعد ذلك، فى ١٩٠١، نوفا آخر فى درب اللبّانة، وكان فى تلك المرة قريبًا إلى حد كاف لقياس مسافته، باستخدام حيلة بارعة تعتمد على سرعة الضوء الآتى من السديم والذى يضيئ سحب الغاز على مسافات مختلفة من النجم المتوهج. وحيث إننا نعرف سرعة انتقال الضوء، يمكن لعلماء الفلك حساب المسافة بين هذه السحب ونجم النوفا (ومن المعروف أنه إذا كان الضوء يستغرق أسبوعًا للوصول إلى سحابة ما فإنها تكون على بعد أسبوع ضوئى من النوفا)، ثم يتم استخدام علم المثلثات لاستنتاج المسافة بين النوفا والسحابة. وتعطى هذه التقنية نتائج تقريبية؛ لأن السحب التى تضاء بهذه الطريقة منتشرة حول النوفا، وبعضها أقرب إلينا من نجم النوفا، وبعضها أبعد منه قليلاً، لكن النتائج التقريبية أفضل من عدم وجود نتائج بالمرة. وكان تقدير المسافة بهذه الطريقة ٥٠٠ سنة ضوئية، أى قريبة فى الجوار بالنسبة لحجم درب اللبّانة. لكن "نوفا" الأندروميدا كان أكثر خفوتًا بمقدار ٢٥٠ مرة مقارنة بالنوفا الذى رُصد فى ١٩٠١، مما يعنى، إذا كانا من نوع الأجرام نفسه، أنه لا بد أن يكون على بعد نحو ٨٠٠٠ سنة ضوئية [٦٠]. ويبدى سديم أندروميدا كما لو كان سحابة مادة داخل درب اللبّانة.

ومع توافر التطور التقنى وتلسكوب المائة بوصة على مونت ولسون، كان فى استطاعة إدوين هابل قياس بعد سديم أندروميدا فى منتصف العشرينيات، بالتعرف على كوكبة النجوم المتغيرة قيفاوس Cepheid فى السديم. وتوصل إلى قيمة للمسافة أطول بكثير. ونعرف حاليا، باستخدام التقنيات المتقدمة المعاصرة، أن هذا "السديم" هو فى الواقع مجرة تشبه درب اللبّانة إلى حد كبير، على بعد يتجاوز ٢ مليون سنة ضوئية. ويمثل هذا الاكتشاف مرحلة مهمة فى تطوير فهم حقيقى لقياس المسافات فى الكون، وأخيراً فى استنتاج عمر الكون (الزمن الذى انقضى منذ الانفجار العظيم).

(٦٠) عليك أن تضرب ٥٠٠ فى الجذر التربيعى للعدد ٢٥٠ للحصول على المسافة من السطوع النسبى؛ لأن السطوع يتناقص مع مربع المسافة.

كما أوضحت فى "مولد الزمان". وأهم ما فى الموضوع هنا هو أنه إذا كان سديم أندروميدا (أو مجرة أندروميدا، كما تُعرف حاليا) على مسافة مقدارها نحو ٢٥٠ مرة مما تم حسابه فى ١٩٠١، فإن "النوفا" الذى شوهد فى ١٨٨٥ يجب أن يكون أكثر سطوعًا بآلاف المرات من "النوفا" الذى شُوهد فى ١٩٠١ فى درب اللبَّانة، ويتوهج بسطوع ١٠٠ مليون شمس على الأقل (٦١) . وما أسرع ما تأكد لدى علماء الفلك تعريف هذا الانفجار النجمى كشىء مختلف تمامًا عن النوفا العادية، عندما أصبح فى قدرتهم أيضًا رصد نجوم نوفا أصلية فى مجرة أندروميدا، ووجدوا أنها بالفعل على درجة من الخفوت تتسق مع المسافات الكبيرة. وبالفعل ظهر فى وقت لاحق أن نجوم النوفا بالغة السطوع تعتبر أكثر سطوعًا حتى مما أشارت إليه الحسابات الأولى، لأن ما رُصد فى ١٨٨٥ فى مجرة أندروميدا كان معتمًا بسبب تأثير السحب والغبار على مدى الرؤية.

وعلينا أن ندرك أن كل ذلك تم قبل عشر سنوات من اكتشاف هانز بيت (وآخرون) لعمليات الاندماج النووى الذى يحافظ على النجوم ساطعة. وكان عدد من العلماء قد أشار فى العشرينيات إلى هذا السطوع الفائق لنجوم النوفا، لكن عالم الفيزياء الفلكية فريتز زويكى بدأ يستخدم مصطلح "سوبر ـنوفا"، بالوصلة بين الكلمتين، فى محاضراته للطلاب فى كالتيك فى بداية الثلاثينيات. وبعد أن كتب هو ووالتر باد بحثًا حول الموضوع فى ١٩٣٤، بعنوان "حول السوبر ـنوفا"، أصبح الاسم كلمة واحدة بدون وصلة بين الكلمتين. وقراءة هذ البحث فى الوقت الراهن، وخاصة بحث ثان نشره نفس الفريق لاحقًا فى العام نفسه ، أمر بالغ الإثارة مثل القراءة الأولى لأبحاث ب٢ف هـ. ولم يكن الأمر بدرجة التنافس نفسها، لأن التعاون بين باد وزويكى فى ١٩٣٤ كان أكثر ميلاً للجوانب النظرية وأكثر دقة. ولكن ما الذى كانت تتضمنه هذه الأبحاث أيضاً؟ لقد كُتبت قبل أن يكتشف علماء الفلك بعدة سنوات أى تفاصيل حول سبب سطوع النجوم (عشر سنوات قبل أن يصبح باد نفسه مثيراً لحماس فريد هويل الشاب لموضوع كيفية

(٦١) وظهور هذا العامل ٢٥٠ هنا كما فى الحساب السابق مجرد توافق، وهذه الأرقام مجرد أرقام تقريبية تقديرية حتى يكون من السهل تصور هذه الظواهر.

إنتاج العناصر الثقيلة فى داخل النجوم). وقبل عامين فقط من التعرف على النيترون بواسطة جيمس شادويك. وبالفعل ظهرت هذه الأبحاث بعد ثلاث سنوات فقط من نشر سوبراهمانيان شاندراسيكار لحساباته التى توضح أن أى قزم أبيض كتلته أكثر من ١,٤ كتلة شمسية لا بد أن يتقلص إلى شكل غامض، وهو ما لم يكن معروفًا فى ذلك الوقت. ويبقى أن باد وزويكى قفزا إلى النتيجة (الصحيحة) التى تضمن أن الخرج الهائل من طاقة السوبرنوفا كان مصحوبًا بتقلص نجم عادى إلى حالة بالغة الكثافة، أكثر كثافة بكثير حتى من القزم الأبيض، وكان النجم فى هذه الحالة متكون بكامله من النيترونات – نجم نيترونى. وكان ذلك مثالاً رائعًا للحدس العلمى، لكنه كان يتفق تمامًا مع أسلوب الاستدلال الذى توصل إليه كونان دويل لحل المعضلات وقاله على لسان بطل قصصه شارلوك هولمز – استبعد المستحيل، وما تبقى لديك، أيًا كان غريبًا، هو الحقيقة حتمًا.

نشر باد وزويكى أفكارهما فى بحثين متتاليين فى "محاضر الأكاديمية الوطنية للعلوم" فى ١٩٣٤ . ويتعامل البحث الأول مع موضوعات توضح مصدر انطلاق الطاقة فى انفجار السوبرنوفا – والتى قدروا معدلها بأنه عشرات ملايين المرات ضعف الإشعاع الصادر بشكل دائم من الشمس. وكانت النتيجة التى توصلا إليها من خلال هذه الحسابات (بعد استبعاد المستحيل) أن الطاقة الكلية المنطلقة من نشاط السوبر – نوفا تمثل جزء ضخمًا منكتلة النجم. وفى البحث الثانى أشارا إلى أن أفضل طريقة لانطلاق طاقة مساوية لكتلة نجم كامل فى مربع سرعة الضوء هى تقلص نجم تحت تأثير الجاذبية وتحوله إلى جرم مدمج. ويطلق التقلص تحت تأثير الجاذبية طاقة دائمًا، وعلينا أن نتذكر هنا أن هذا هو السبب الأساسى للسخونة داخل النجوم. وحتى يمكن السوبرنوفا أن تطلق هذه الكمية الضخمة من الطاقة، كان على باد وزويكى أن يصلا بالضرورة إلى نتيجة مؤداها أن النتيجة النهائية للتقلص لا بد أن تكون مادة فى أقصى درجات الكثافة، على هيئة نيوترونات.

ولم يكن ذلك مجرد تخمين: ففى ١٩٣٢ انطلق عالم الفيزياء الروسى ليف لاندو، الذى كان حينئذ فى زيارة لمعهد نلز بور للأبحاث فى كوبنهاجن، من إعلان شادويك بأنه تعرف على النيوترون، وقال لزملائه فى المعهد فوراً إن النجوم يجب أن تحتوى على

كرات من مادة النيوترون في قلوبها. وكان يرى أن الطاقة التي تطلقها النجوم بشكل مستمر خلال عمرها يجب أن تكون ناتجة عن تقلص تدريجي للمادة في الطبقات الخارجية للنجم إلى هذا القلب النيوتروني، لكن باد وزويكي كانا يقولان بأن النجم النيوتروني تشكّل كله في وقت واحد، بإطلاقه كل طاقة الجاذبية المتاحة خلال عدة أيام. وقالا "لقد طوّرنا وجهة النظر التي ترى أن السوبر – نوفا تمثل تحولاً لنجم عادي إلى نجم **نيوتروني** [٦٢]، يتكون في معظمه من النيوترونات. وقد يكون لهذا النجم نصف قطر صغير جداً وكثافة بالغة الارتفاع، وبذلك يمثل الترتيب الأكثر استقراراً لهذا النوع من المادة".

وكان لاندو قد عاد إلى الاتحاد السوفياتي، كما كان يُطلق عليه حينئذ، في ١٩٢٢، ولم ينشر أي من أفكاره حول "القلوب" النيوترونية حتى ١٩٣٨، وفي نفس الوقت كان الأمريكي روبرت أوبنهايمر قد أصبح مهتمًا باحتمال وجود النجوم النيوترونية، ونشر بالتعاون مع عدد من طلابه سلسلة من الأبحاث في نهاية الثلاثينيات يناقش فيها الخواص المحتملة لهذه الأجرام إذا كانت القوانين المعروفة للفيزياء (خاصة الأفكار الجديدة لميكانيكا الكم) صحيحة. وكانت أهم نتائج هذه الأبحاث هي، تمامًا كما أوضح شاندراسيكار، أن هناك حداً لكتلة النجم القزمي حتى لا ينهار (وربما كان يُنظر إليه في ١٩٣٨ على أنه نجم نيوتروني)، وتوصل فريق أوبنهايمر إلى وجود حد لكتلة النجم النيوتروني لا ينهار قبله. لكن باد وزويكي كانا على حق – في أن النجم النيوتروني يمثل "الترتيب الأكثر استقراراً لهذا النوع من المادة". وعندما ينهار نجم نيوتروني ذو كتلة فائقة، فإنه ينهار بشكل كامل .يختفي فيما يعرف الآن بالثقب الأسود. وتصل الكتلة الحرجة لنجم نيوتروني، المعروفة حاليا بحد أوبنهايمر – فولكوف، إلى نحو ٣ كتل شمسية.

ولم يتم استكمال أي من هذه الأفكار بشكل فوري في الأربعينيات. وأحد الأسباب أن العلماء ابتعدوا عن أبحاثهم الأكاديمية في الحرب العالمية الثانية – وكان أوبنهايمر نفسه أحد البارزين في مشروع مانهاتن، الذي أدى إلى صنع أول قنبلة نووية. وكان

(٦٢) هنا اللذان كتبا الاسم بالحروف المائلة.

لهذا الأمر تأثير كبير على تطور علم الفلك (وبالأحرى على نقص التطور في هذا الجانب من علم الفلك في ذلك الوقت) حتى أن علماء النظريات تسابقوا إلى المراصد، وحصلوا على أفكار لا يمكن اختبارها بمقارنتها بدلائل الرصد التي كانت متوافرة في ذلك الوقت. ورغم رؤية بضع نجوم سوبرنوفا في أزمنة ما قبل التلسكوب، في ١٩٣٤، عندما اقترح باد وزويكي لأول مرة أن انفجارات السوبرنوفا تحصل على طاقاتها من الانفجار تحت تأثير الجاذبية، فإنه تمت رؤية عشرين سوبرنوفا وتصويرها فوتوغرافياً، ولم يُدرس أي منها بالتفصيل لكي يتم تحليل أطيافها. وظل الحال على هذا المنوال حتى ١٩٣٦ عندما أصبح من الممكن تشغيل نوع خاص من التلسكوب الفوتوغرافي المعروف باسم كاميرا شميدت على مونت بالومار في كاليفورنيا، حيث تم بناء التلسكوب الجديد ٢٠٠ بوصة (٥ أمتار)، وبدأ زويكي حينئذ يعثر بشكل منتظم على نجوم السوبرنوفا في مجرات ما وراء درب اللبّانة، كل عدة سنوات. وكانت تلك هي بداية الدراسة العلمية لنجوم السوبرنوفا. وبمساعدة كاميرا شنيدر، ذات مجال الرؤية الواسع، رصد زويكي كثيراً من المجرات، وبمجرد عثوره على نجم سوبرنوفا كان ينبه زملاءه في مونت ولسون القريبه أين يمكن للتلسكوب ١٠٠ بوصة (الذي كان الأفضل في العالم) أن يجد أطياف هذه النجوم.

ومرة أخرى بعد أن صارت الأمور جديرة بالاهتمام تقلص المشروع بسبب الحرب العالمية الثانية. ومع نهاية الأربعينيات كان قد بدأ تشغيل كاميرا شميدت أكبر، مثل التلسكوب ٢٠٠ بوصة، واكتشف المزيد من السوبرنوفا في السنوات والعقود التالية. وفي وقت وفاة زويكي عام ١٩٧٤، كان قد تم رصد أكثر من أربعمائة من هذه الأجرام بعض التفاصيل، وكان قد اكتشف أكثر من ربع هذا العدد. ومع التصوير الفوتوغرافي لآلاف من السوبرنوفا وتحليل البيانات بمنظار الطيف، في نهاية السبعينيات وخلال الثمانينيات، أصبح لدى علماء الفلك أخيراً صورة واضحة عن ما يحدث، وعن حقيقة وجود أكثر من نوع واحد من السوبرنوفا.

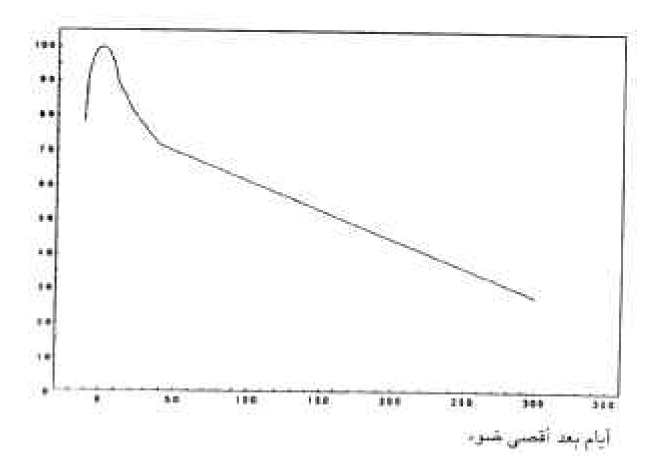
وأهم تمييز بين الأنواع يكون بين نوعي السوبرنوفا المعروفين بالنوع ١ والنوع ٢ (وهناك تقسيم فرعي يهم المتخصصين، لا أرغب في الانشغال به هنا). وأهم ما يجب

علىّ قوله في هذا الموضوع أن نوعي السوبرنوفا ينتج عنهما كميات مختلفة من العناصر المتعددة، وكلا النوعين يرتبطان بالمواد التي تتكون منها أجسامنا. وبدأت ملامح هذه الحكاية تظهر ببطئ؛ من الجمع العادي بين ملاحظات الرصد التي ثبتت صحتها، المعتمدة على تقنيات تلسكوبية أفضل، والنماذج النظرية المتطورة، المعتمدة على عمليات المحاكات على الكمبيوتر حول ما يحدث داخل النجوم عند انتهاء إمكانياتها. لكن هذه الحكاية اكتملت بشكل أو بآخر في منتصف الثمانينيات.

ويعتمد التمييز بين نوعي السوبرنوفا على الفروق التي تم رصدها في سلوكهما. ويطلق على طريقة سطوع نجم ثم إعتامه منحنى الضوء، وتتماثل منحنيات الضوء للنوع ١ من السوبرنوفا إلى حد كبير (٦٣). ويظهر على هذا النوع ارتفاع سريع في اتجاه السطوع الأقصى الذي يستغرق نحو أسبوعين، ثم يتبع ذلك فوراً انحدار ثابت خلال عدة أسابيع تالية، يتلوه خفوت أسي تدريجي في السطوع. ويتسغرق هذا الخفوت الأسي عدداً محدداً من الأيام حتى يخبو النجم إلى نصف سطوعه (ربع أقصى سطوع)، وهكذا. و"العمر النصفي" لمنحنى ضوء النوع ١ من السوبرنوفا يصل إلى نحو ٥٠ يوماً.

وبهذا التمييز للسلوك الشامل لضوء هذه النجوم، فإن طيف النوع ١ من السوبرنوفا لا يشبه أي نوع آخر من النجوم. وعندما يكون هذا النوع في مرحلة سطوعه، لا يظهر عليه أي خطوط حادة تناظر وجود ذرات عناصر محددة، ولكن تظهر أحزمة واسعة من الضوء والظلام. ويُفسَّر ذلك بأنه يشير إلى أن الضوء قادم من خليط من المواد يتحرك بطريقة عنيفة وهائجة، مع وجود ذرات مفردة تتحرك بسرعة في حالة تشوش، حتى أن الضوء القادم من ذرة مفردة قد ينحرف إلى الأزرق بدرجة كبيرة (إذا كان يقصدنا) أو بدرجة كبيرة إلى الأحمر (إذا كان يبتعد عنا). ويتبقع الإطار العادي

(٦٢) إذا حدث وقرأ أحد المتخصصين هذا الكلام، فإنني من الآن فصاعداً عندما أشير إلى النوع ١ من السوبرنوفا، فإنني أقصد في الواقع النوع ١ أ من السوبرنوفا

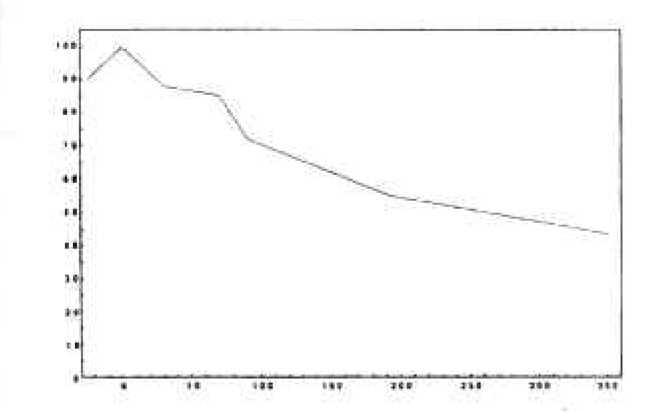


شكل (٨ – ١): منحنى بياني للضوء يوضح السلوك الفعلي للنوع ١ من السوبرنوفا

الخطوط المضيئة والمظلمة في الطيف بواسطة انحرافات دوبلر الضخمة ويتحول إلى أحزمة واسعة من الضوء والظلام. وحتى يحدث هذا الأمر فلابد أن الذرات تتحرك بسرعة ١٠٠٠٠ كم/ث على الأقل – أسرع بنحو عشرة آلاف مرة من السرعات العشوائية للجزيئات في الهواء الذي نتنفسه. ومن الواضح هنا أن الطيف لا يبدأ في الظهور من تبقع أحزمة الضوء والظلام الناتجة إلا عندما تبرد المادة ويخبو السوبرنوفا قليلا من سطوعه الأقصى.

ولا تتشبه كل منحنيات الضوء للنوع ٢ من السوبرنوفا بعضها البعض. لكن المهم أن أي منها لا يشبه منحنى ضوء سوبرنوفا النوع ١. ولا يقتصر الأمر على أن سوبرنوفا النوع ٢ يسطع ثم يبدأ في الخفوت فجأة، لكنه يظل في سطوعه الأقصى بعض الوقت، ربما أسابيع، ثم يخبو ببطئ أكثر من سوبرنوفا النوع ١. ويختلف أطياف النوع ٢ أيضا. ورغم أن الذرات تتحرك بالسرعة الكافية لتوسيع الخطوط

المناظرة لها. لكنها لا تتحرك بسرعة الذرات في النوع ١ من السوبرنوفا (تقريباً بعشر سرعته)، لذلك يمكن أن يظل التعرف على خطوط الطيف أكثر سهولة نسبياً، حتى عند السطوع الأقصى. وهناك دائماً كمية كبيرة من الهيدروجين في المادة المنطلقة من سوبرنوفا النوع ٢، كما هو متوقع، لكن هناك أيضاً كمية كبيرة من المواد الأخرى، بما في ذلك الهليوم والمغنسيوم والسليكون. وإنه لأمر ذو دلالة أنه عند تحليل طيف سوبرنوفا النوع ١ لا نجد دليلاً على وجود الهيدروجين في الانفجار، رغم أن الهيدروجين يعتبر إلى حد بعيد العنصر الأكثر شيوعاً في الكون. لكننا نجد ما يدل على وجود عناصر أخرى عندما يبرد السوبرنوفا من النوع ١، بما في ذلك الحديد، وهذا أمر بالغ الأهمية.



شكل (٨-٢) : منحنى بياني للضوء يوضح السلوك الفعلي للسوبرنوفا من النوع ٢ . والسمة المهمة هنا هو أن هبوط السطوع أكثر تدرجاً من نظيره بالنسبة للسوبرنوفا من ١، والفروق الأخرى بين نوعي الانفجار النجمي موضحة في النص

وهناك اختلاف آخر بين النوع ١ والنوع ٢ من السوبرنوفا، حيث يمكن أن يحدث انفجار السوبرنوفا من النوع ١ في أي مكان من مجرة حلزونية مثل مجرة درب اللبانة، وأيضاً أي مجرات بيضاوية الشكل. لكن السوبرنوفا من النوع ٢ لا تُشاهد إلا على أطراف المجرات الحلزونية، بين سحب الغبار والغاز المعروف عنها أنها تكون مصحوبة بعمليات ميلاد نجوم جديدة. وأخيراً فإن السوبرنوفا من النوع ١ تكون أكثر سطوعاً من النوع ٢ - ولكل سوبرنوفا النوع ١ نفس السطوع، وتكون أكثر سطوعاً في الواقع بما يتراوح بين ثلاث إلى عشر مرات مقارنة بالنوع ٢ ؛ لأن نجوم النوع ٢ ليس لها جميعاً نفس السطوع. وهذا ما يجعل رصد النوع ١ أكثر سهولة في المجرات الخافتة البعيدة تماماً في الكون. ومع ذلك فإنه من المثير للاهتمام أن نعرف أن السوبرنوفا من النوع ٢ يطلق طاقة أكثر بكثير من النوع ١، ولهذا السبب بالذات تظهر أغلب الطاقة المنطلقة من النوع ١ على هيئة ضوء مرئي، بينما تظهر أغلب طاقة النوع ٢ بطرق أخرى. وحان الوقت لكي نوضح السبب وراء اختلاف هذين النوعين من موت النجوم كل هذا الاختلاف.

يظهر النوع ١ من السوبرنوفا في المنظومات الثنائية التي تشبه إلى حد بعيد المنظومات التي تظهر فيها نجوم نوفا العادية. وأهم اختلاف أنه في أسلاف السوبرنوفا من النوع ١، تتحول المادة إلى نجم قزم أبيض يكون عادة عند حد شاندراسيكار البالغ ١.٤ كتلة شمسية. وفي أحوال أخرى قد يستغرق الأمر زمناً بالغ الطول لكي يتطور نجم معزول بهذه الكتلة فقط إلى حد أن يصبح قزماً أبيض، ولكن نظراً لوجود هذه النجوم في المنظومات الثنائية، يمكن الإسراع بالتطور النجمي بشكل ملحوظ - وتتأثر طريقة تقدم النجم في العمر بوجود نجم مرافق له قريب منه. ويقضي النجم الأكبر في المنظومة الثنائية دورة حياته بمعدل أكثر سرعة من النجم الأصغر، ويصبح عملاقاً أحمر. لكنه عندما يصل إلى هذه المرحلة يجرده شد جاذبية رفيقه، الذي لم يصل بعد إلى هذه المرحلة من دورة حياته، من كتلته التي تحتوي عليها الطبقات الخارجية للنجم العملاق، تاركاً القلب، الغني بالكربون والأكسجين الناتجين عن احتراق الهليوم. وتحتوي المنظومة على عملاق أبيض، حتى لو لم تكن قديمة بالمقاييس النجمية.

عندئذ قد يصبح الرفيق الأصغر أكثر ضخامة من بقايا هذا القزم الأبيض، ويتحول بدوره إلى عملاق، يعيد المادة إلى القزم الأبيض المتكون من الكربون والأكسجين. ويستطيع علماء الفلك رؤية هذه العملية بالفعل وهي نشطة في بعض المنظومات الثنائية؛ لأن المادة المنتقلة تصبح بالغة السخونة إلى درجة أنها تُطلق أشعة سينية، يمكن رصدها، عندما تصطدم بالقزم الأبيض. ويكسب القزم الأبيض كتلة نتيجة لذلك، حتى يصل إلى نقطة يصبح عندها على حد شاندراسيكار فيبدأ قلب النجم في التقلص. لكنه يصير فجأة على درجة من السخونة تجعل الكربون يبدأ في الاندماج، فيطلق مزيداً من الطاقة ويسبب موجة من الاندماج النووي تنطلق في النجم بكامله مثل شعلة بالغة السرعة. ويحدث ذلك الأمر اضطراباً في النجم بكاملة ويفجر كل مادته - كل المادة الناتجة عن انفجار الاندماج ذلك - ويطلقها في الفضاء، فيما يشبه إلى حد بعيد ما صوره هويل وفولر في الستينيات.

لكن المفهوم الجديد للنوع ١ من السوبرنوفا تجاوز كثيرا تخمينات هويل وفولر. وبسبب ظهور كل نجوم النوع ١ من السوبرنوفا بنفس الطريقة دائمًا، عند كتلة شاندراسيكار تمامًا، ووصولها جميعًا إلى نفس السطوع الأقصى، فإنها تبدو متشابهة. لكن حيث إن القزم الأبيض يحتاج إلى مئات الملايين من السنوات لتكوين مادته تحت حد شاندراسيكار حتى يصل إلى القيمة الحرجة، وحيث إنه قد يستغرق مدة أطول لكي تتطور المنظومة الثنائية إلى الحد الذي يجعل الكتلة تتحول من نجم عملاق إلى قزم أبيض من الكربون والأكسجين، فإن النوع ١ من السوبرنوفا يرتبط عادة بالنجوم القديمة، والنجوم القديمة منتشرة في كل المجرة.

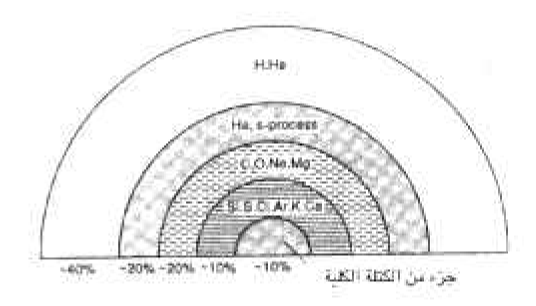
وهذه العملية الشبيهة بانفجار الاحتراق النووي التي تحدث في هذه الحالة تعتبر بالغة الكثافة لدرجة أنها تقطع مسار التحول من الكربون والأكسجين إلى مجموعة عناصر الحديد في وقت بالغ القصر تجعل "الشعلة" تنطلق عبر مادة القزم الأبيض. وتتابع التفاعلات النووية طريقها إلى تكوين نيكل - ٥٦ ، الذي يتحلل إلى كوبلت - ٥٦ ، الذي يتحلل بدوره إلى حديد - ٥٦ مستقر. وتواصل عمليات التحلل الإشعاعي، التي تخضع لقانون أسي، طريقها وهي تطلق طاقة في بقايا السوبرنوفا بعد انتهاء الكثافة القصوى الأولية، مما ينتج عنه سمات "نصف حياة" منحنى هابط الضوء.

وتقترب الطاقة الكلية المنطلقة في النوع ١ من السوبرنوفا بدرجة كبيرة من كمية الطاقة النووية التي يمكن أن تنطلق إذا تم تحويل نحو ثلثي كتلة شمسية من الكربون والأكسجين إلى حديد. ويتحول نحو نصف كتلة القزم الأبيض الأصلي إلى حديد بهذه الطريقة، مع كمية أصغر من العناصر الأخرى مثل السليكون والكبريت التي توجد مصاحبة للانفجار وتتناثر في الفضاء. ورغم ذلك من المهم معرفة أن النوع ١ من السوبرنوفا لا ينتج عنه أية عناصر أكثر ثقلاً من الحديد. مما يجعلنا ننتقل إلى النوع ٢ من السوبرنوفا.

تظهر أحداث النوع ٢ من السوبرنوفا، كما أشرت سابقًا، في النجوم التي تبدأ حياتها بكتل أكثر من نحو ٨ - ١٠ كتلة شمسية. وهذه هي النجوم التي تعيش بسرعة وتموت شابة. تذكر أن النجم الذي له كتلة ٤ كتل شمسية يكون عمره في التتالي الرئيسي نحو ٥٠٠ مليون سنة، بينما يظل النجم الذي تصل كتلته إلى ٢٠ كتلة شمسية في التتالي الرئيسي بضع ملايين السنوات فقط. وهذا هو سبب رؤيتنا للنوع ٢ من السوبرنوفا في أقراص الغبار في المجرات مثل مجرة درب اللبّانة، في المناطق التي يكون تكوين النجوم فيها مازال جارياً. والنجوم التي تعيش بضع ملايين السنوات فقط لا يكون لديها الوقت الكافي للابتعاد عن مواطن نشأتها قبل موتها. وإذا أردنا تصور ذلك، فإن الشمس تحتاج إلى نحو ٢٥٠ مليون سنة لإكمال مدار واحد حول مركز المجرة، وهي رحلة قامت بها نحو ١٨ مرة منذ مولدها. لكن النجم الذي تصل كتلته إلى ٢٠ كتلة شمسية لن يكون لديه الوقت الكافي لإكمال حتى ١ في المائة من دورة واحدة في درب اللبّانة قبل انفجاره.

وعندما يكون هذا النجم في طريقه إلى هذه النهاية الانفجارية، فإنه سيمر بكل مراحل تحرير الطاقة بواسطة تفاعلات الاندماج، متحولاً من الهيدروجين إلى مجموعة عناصر الحديد. وهو يفعل ذلك خلال عدة مراحل، بالطريقة التي سبق أن شرحتها، حيث يتبع كل وقود تم اندماجه في قلب النجم في دوره، انهيار يرفع درجة الحرارة إلى حد يجعل المرحلة الثانية من الاحتراق النووي تبدأ. لكن يظل هناك في كل مرة، تماماً كما يحدث عند وجود قشرة من مادة الهيدروجين المشتعل تحيط بقلب هليوم مشتعل في العملاق الأحمر ذي الكتلة المنخفضة، شروط بعيدة عن مركز النجم حيث يمكن

استمرار وجود مراحل مبكرة من الاحتراق النووى. وبمرور الوقت يتطور النجم الضخم إلى حد تكوين قلب من الحديد في مركزه، ويكون محاطًا بسلاسل قشور حيث تستمر التفاعلات النووية الأخرى، تغلف القلب بإحكام مثل طبقات البصلة. وخارج القلب الحديد، يتحول السليكون إلى حديد، في القشرة التالية، و"يحترق" الاكسجين (مع بعض النيون) لإنتاج سليكون، وعلى بُعد قريب إلى حد ما، يتحول الكربون إلى اكسجين، وفى الطبقة التالية تنتج عملية ألفا الثلاثية الكربون من الهليوم، وعلى قمة كل هذا النشاط هناك طبقة يظل الهيدروجين يتحول فيها إلى هليوم.



شكل (٨-٣) : بنية "قشرة البصلة" في أقصى عمق قلب النجم الضخم قبل أن يصير سوبرنوفا مباشرة. انظر النص حيث التفاصيل.

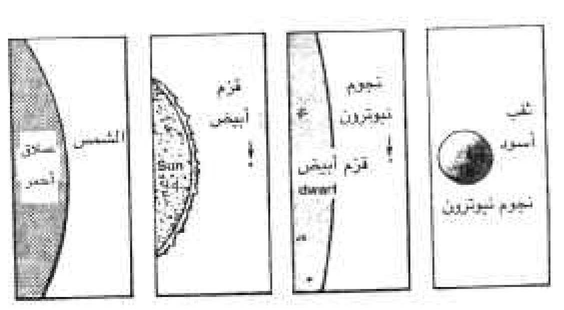
وبالنسبة لنجم تتراوح كتلته بين ١٥ و٢٠ كتلة شمسية ويكون قد اقترب من نهاية حياته، قد يحتوى القلب الحديدى على كتلة أكبر من كتلة الشمس، لكن يكون قطره هو قطر الأرض تقريبًا، مثل القزم الأبيض بطبقاته الرقيقة الناتجة من نشاط الاندماج والتى تغلفه بإحكام. وتتكون قشور البصلة هذه من خليط من المواد - وتحتوى طبقة السليكون أيضًا على بقايا كبريت وأرجون وكلور وبوتاسيوم وكالسيوم، بينما تحتوى

طبقة الاكسجين أيضا على بقايا نيون ومغنسيوم. ويكون حجم النجم بكامله مقداره خمسين مرة على الأقل من حجم شمسنا في وضعها الراهن - وربما يكون أكبر من ذلك، اعتماداً على كثرة (أو قلة) غلافه الأصلي الذى فُقد. وبسبب هذا الفقد للكتلة، لا يظل بنفس الضخامة التى كان عليها، وربما تتناثر من ٢ إلى ٣ كتلة شمسية من مادته (قد تكون غنية بالنتروجين) بعيداً إلى الفضاء.

وتحدث المراحل التالية للاحتراق النووى للنجم الضخم بسرعة مذهلة. وبالنسبة لنجم بدأ بكتلة نحو ١٧ - ١٨ كتلة شمسية، وبعد بضع ملايين من السنوات فى التتالى الرئيسى، يكون احتراق الهليوم قد حافظ على العملاق الأحمر ساطعاً إلى نحو مليون سنة، وقد يقوم احتراق الكربون بأداء هذه الوظيفة خلال ١٢٠٠٠ سنة فقط، وقد تحافظ الطاقة المنطلقة من النيون والاكسجين على الطبقات الخارجية إلى نحو ١٠ سنوات، وقد يحترق السليكون فى بضعة أيام. وها هى الأحداث وقد أصبحت مثيرة.

ولأن إنتاج نوى العناصر الأكثر ثقلاً من الحديد يحتاج إلى طاقة من اندماج النوى الأكثر خفة معا، فإنه بمجرد تحول قلب النجم إلى حديد لا يتعرض بعد ذلك لاندماج نووى يتيح طاقة للمحافظة على النجم. وبالفعل لا يمكن للنجم أن يظل متماسكا. وعبر ملايين السنين كبحت عملية الاندماج الجاذبية، والآن تنتقم الجاذبية لنفسها. يتقلص القلب الحديدى إلى درجة كبيرة فى أقل من واحد على عشرة من الثانية، ويطلق الانهيار طاقة جاذبية. لكن ذلك لا يصل إلى حد تسخين النجم. وبدلاً من ذلك تتحول الطاقة إلى طاقة حركية يتم استخدامها فى سحق نوى الحديد وفصلها بالتصادمات لتدمير كل ما فعله الاندماج، وتحويل هذه النوى إلى مزيج من البروتونات والنيوترونات. وحيث إن هذا الأمر يمتص طاقة (يمتص بالتقريب طاقة فى جزء من الثانية مماثلة لما أطلقه النجم فى كل حياته السابقة)، مما يجعل قلب النجم يبرد بسرعة، ويؤدى ذلك إلى مزيد من التقلص (الذى يطلق بدوره مزيداً من طاقة الجاذبية). وتكون هذه العملية بالغة العنف بحيث يتخطى النجم مرحلة القزم الأبيض، وتحت ظروف الكثافة القصوى والضغط الأقصى تضطر الالكترونات الناتجة إلى الاتحاد بالبروتونات لصنع نيوترونات وهو عكس العملية المعتادة لتحلل بيتا، حيث يطلق النيوترون إلكتروناً ويصبح بروتوناً ولكل بروتون يتشكل بهذه الطريقة، يُطلق نيوترينو واحد. ويساوى العدد الكلى

النيوترينوات المنطلقة، في جزء من الثانية، العدد الكلي للبروتونات في القلب الحديدي في بداية الانهيار – نحو ١٠ (٥٧)، وهو رقم مرتفع جداً بحيث لا يمكن تصوره، لكن لا مانع من المحاولة. تكون الطاقة الكلية المنطلقة في النوع ٢ من السوبرنوفا أعلى بنحو مائة مرة من الطاقة الكلية الخارجة من الشمس طوال عمرها، لكن ١ في المائة فقط من هذه الطاقة يكون على هيئة ضوء مرئي. وتحمل النيوترينوات نسبة ٩٩ في المائة الباقية. وكل هذه الطاقة ناتجة عن طاقة الجاذبية التي تنطلق عند انهيار كرة من مواد كتلتها مثل كتلة الشمس، من حجم مماثل للأرض إلى حجم يماثل جزيرة مانهاتن.



شكل (٨ – ٤) : الأحجام النسبية للنجوم.

وإذا كان لكرة المواد المنهارة كتلة أكثر من ٣ كتل شمسية في هذه المرحلة، فلا يوجد ما يمكنه إيقاف الانهيار. وتصبح هذه المواد ثقباً أسود، الذي يمثل الانتصار النهائي للجاذبية على المادة، لكن في الغالبية العظمى من النجوم الضخمة، بما في ذلك أغلب النجوم التي تصبح من النوع ٢ من السوبرنوفا، لا يكون الأمر كذلك. وبدلاً منه

يتوقف انهيار كرة النيوترونات فجأة، عندما تُصلب العمليات الكمية المادة وتمنع النيوترونات من الاندماج في بعضها البعض على هيئة كتلة خفيفة غير منتظمة الشكل. ويحدث التصلب في الواقع بشكل مفاجئ حتى أن النجم النيوتروني حديث التكوين – وهو ما يكون عليه في هذه الحالة – يرتد قليلاً، مثل كرة جولف مضغوطة في يد حديدية يتم إطلاقها فجأة، قبل أن تستقر في حالة متزنة، وتقترب كمية الموادة الموجودة فيه من كتلة شمسنا مضغوطة في كرة قطرها أقل من ١٠ كيلومترات.

وتشير آخر نتائج المحاكاة بالكمبيوتر إلى أن هذه العملية تحدث على مرحلتين، حيث يتقلص القلب كله فجأة (في بضع كسور عشرية من الثانية) إلى كرة من المواد النووية قطرها نحو ١٠٠ كيلومتر. وعند هذه النقطة يصل جزء أقل من نصف المادة، الذي يكون في المركز تماماً، إلى كثافة بالغة الارتفاع إلى درجة تعجل عملية التصلب الكمي تبدأ، فيثب القلب الداخلي. وتؤدي الوثبة إلى تماوجات خلال المادة الموجودة خارج القلب النيوتروني تماماً، تلك المادة التي تكون قد أضيفت بسبب التقلص. ومن الصعب اعتبار "التموج" كلمة معبرة عن موجات الصدمة الناتجة عن ارتداد هذه المادة المضافة، التي تتحرك بسرعة تقترب من ١٥ في المائة من سرعة الضوء، من القلب النيوتروني المتذبذب. ومع استقرار النجم النيوتروني، مستغرقاً عدة ثوان لكي تتقلص كرة النيوترون بكاملها إلى قطر ١٠ كيلومترات تقريباً، تتحول كل كمية الحركة المتجهة إلى الداخل، والناتجة عن الانهيار، بواسطة الوثبة، إلى كمية حركة إلى الخارج في موجة صدمة تسارع متجهة إلى الخارج قادمة من قلب النجم.

ولكن يندر خلال وقوع كل هذه الأحداث، أن تتأثر الطبقات الخارجية النحيلة النجم – التي تصل كتلتها إلى نحو ١٢ كتلة شمسية، وتمتد إلى ما يتراوح بين ٥٠ ضعف نصف قطر شمسي أو أكثر، بما يحدث. ويستغرق انهيار القلب بالكامل، على نحو تقريبي، بضع ثوان. لكن الأمر قد يحتاج إلى عدة دقائق لكي تسقط الطبقات الداخلية في الجزء الخارجي من النجم إلى الثقب الذي ظهر تحتها، وخلال تشكل النجم النيوتروني تكون تلك الطبقات معلقة بالضرورة دون ما يسندها فوق الفراغ. وكما يحب علماء النظريات الذين يدرسون السوبرنوفا أن يشيروا، فإن الأمر يبدو مشابهاً لمصير الشخصية الكرتونية التي تجري إلى جرف ثم تصبح معلقة بدون حركة في الهواء حتى

تلاحظ ما حدث. وفى النوع ٢ من السوبرنوفا؛ فبمجرد أن تبدأ الطبقات الخارجية للنجم فى السقوط تتلقى ضربة من أسفلها بواسطة موجة الصدمة المنطلقة إلى الخارج، فتحاول دفعها إلى أعلى وإزاحتها عن الطريق.

ولا تنجح موجة الصدمة وحدها أبداً فى تنفيذ ذلك. فعندما تشق طريقها فى الجزء العلوى من النجم فإنها تكوّم المادة التى تقابلها، مثل اندفاع الجليد الذى يشق طريقه خلال ممر جبلى مغلق تماماً بسبب انجراف كميات ضخمة من الجليد. وتتباطأ سرعة موجة الصدمة، التى تحاول دفع ما يوازى ١٢ كتلة شمسية من مواد النجم أمامها، كلما ارتفعت كثافة المادة التى راكمتها الصدمة، وقد تتوقف على الفور إلا إذا حدث أمر واحد أو على الأرجح عدد كبير من أحداث بالغة الصغر. وتُطلق المرحلة الثانية من الانهيار، التى تجعل قطر القلب النيوترونى البالغ نحو ١٠٠ كيلومتر يصير نحو ١٠ كيلومترات، كمية ضخمة من طاقة الجاذبية، التى تتحول إلى حرارة وترفع درجة حرارة النجم النيوترونى إلى نحو ١٠٠ مليار درجة. وتحت هذه الظروف تظهر طاقة الحرارة على شكل أشعة جاما، وليس الضوء المرئى، وتتحول أشعة جاما إلى إلكترونات وبوزيترونات (تبعًا لمعادلة الطاقة تساوى الكتلة فى مربع السرعة). ويشارك الكثير من هذه الجسيمات فى التفاعلات التى ينتج عنها نيوترينوات - ينتج مزيد من النيوترينوات التى تزيد بعدة مرات عن تلك التى وصل عددها إلى $١٠^{٥٧}$ عندما تحولت كل البروتونات فى القلب إلى نيوترونات. وخلال الثوان العشر أو ما يقترب منها التى يستغرقها القلب النيوترونى لاستكمال عملية الانهيار، يتم إنتاج كثير من النيوترينوات لدرجة أنها تستثير طاقة أكبر مائة مرة من الطاقة المنطلقة من مادة انفجار النجم، وتنطلق بسرعة تقترب جداً من سرعة الضوء، ويخترق أغلبها كل الطبقات الخارجية للنجم فى طريقها إلى الفضاء.

من جانب آخر فإن أهم ما فى الموضوع أنها لا تفعل ذلك كلها. فالنيوترينوات مشهور عنها أنها مقاومة للتفاعل مع أى شىء، ورغم وجود نحو مليار منها فى كل متر مكعب فى الكون (بما فى ذلك كل متر مكعب من الحجرة التى تجلس فيها)، لا يتعدى الأمر أننا لا نلاحظها فى حياتنا اليومية. فإذا كان على حزمة من النيوترينوات أن تنتقل خلال حائط من الرصاص الصلب سمكه ٢٠٠٠٠ سنة ضوئية، لا يمكن

امتصاص سوى نصفها فقط بواسطة نوى الرصاص طوال هذا المسار. ويبقى القول بأن موجة الصدمة التى تحاول الانطلاق عبر النجم وهو فى طريقه إلى الموت قد تصل إلى كثافة عالية تتيح لها امتصاص عدد معقول من النيوترينوات من القلب، فتعطيها ذلك دعماً لكى تواصل الانطلاق بسرعة تقترب من ٢ فى المائة من سرعة الضوء، وفى آخر الأمر تفجر الطبقة الخارجية للنجم بكاملها (وتمثل هذه الطبقة نصف الكتلة الأساسية كلها على الأقل) وتطلقها إلى الفضاء. وقد تحدث خلال هذه العمليات تفاعلات نووية تشارك فيها النيوترونات فى الصدمة نفسها، مما ينتج عنه عناصر ثقيلة جداً بواسطة العملية - ر. وتنشط بقايا النيوترينوات، التى تنتقل بسرعة تقترب كثيراً من سرعة الضوء، مندفعة خلال بقايا غلاف النجم وتنقلت إلى الفضاء قبل أن يلاحظ أى مراقب للنجم من خارجه أن شيئًا غير عادى قد حدث. وتصل النيوترينوات إلى سطح النجم قبل نحو ساعتين من وصول موجة الصدمة، وتتحرك بسرعة مقدارها خمس سرعة الضوء "فقط"، وتصل إلى السطح. ولا يُرى النجم كسوبرنوفا إلا عندما تصل موجة الصدمة إلى سطح النجم.

لكن ما نهتم به هنا هو العناصر نفسها، أكثر من تفاصيل طبيعة عمل السوبرنوفا. ولقد وجدنا على الأقل المكان الذى تُصنع فيه أشياء مثل النحاس واليورانيوم والفضة والزئبق والرصاص. ولكن لا تظن أنه يتم إنتاجها بنفس كميات العناصر الأكثر خفة خلال المراحل المبكرة من حياة النجم. وتذكر أن الهيدروجين والهليوم يمثلان معا ٩٩ فى المائة من كل كتلة الكون الموجود على هيئة نوى ذرية. وكل العناصر من الليثيوم (بثلاث بروتونات للنواة) إلى مجموعة الحديد (بعدد ٢٦ بروتون لكل نواة) تمثل مع بعضها البعض أقل من ١ فى المائة من كتلة الهيدروجين والهليوم إذا جمعا معا. ويبقى القول بأن هذين العنصرين شائعين مقارنة بكل ما هو خلافهما. تمثل كتلة النوى فى الكون التى يكون لها ٢٦ بروتون فى كل نواة تمثل أقل من واحد فى الألف من كتلة كل شىء من الليثيوم إلى الحديد. وإذا أخرجت النيكل - ٢٦ من حساباتك تمثل العناصر الثقيلة واحد من عشرة آلاف فقط من كتلة كل العناصر الخفيفة فيما عدا الهيدروجين والهليوم.

وهناك خاصية مميزة أخرى لطريقة صناعة العناصر وتوزيعها بواسطة السوبرنوفا تستحق الإشارة إليها. لقد رأينا تواً أن النوع ١ من السوبرنوفا جيد جداً في نثر الحديد في الفضاء. لكن النوع ٢ من السوبرنوفا، حتى رغم أنه يتعرض لانهيار القلب الحديدي، نادراً ما يطلق حديداً في الفضاء - ويذهب كله في صناعة نجم نيوتروني جديد. ومن ناحية أخرى، تكون الطبقات الخارجية من سلف النوع ٢ من السوبرنوفا غنية بالأكسجين، الذي ينفجر بعيداً في الفضاء بواسطة موجة الصدمة. وينطلق من النوع ٢ من السوبرنوفا الذي وصفته تواً نحو ١,٦ كتلة شمسية من الأكسجين، بينما، كما أوضحت سابقاً، يطلق النوع ١ من السوبرنوفا نحو ثلثي كتلة شمسية من الحديد. والحديد والأكسجين اللذان نراهما حولنا، في الكون على المقياس الكبير ولكن بشكل خاص في الشمس نفسها، هو خليط ناتج عن كلا من نوعي العمليات، وتؤكد حقيقة عدم هيمنة الحديد أو الأكسجين على هذا الخليط أن كلا نوعي السوبرنوفا كانا ناشطين في درب اللبّانة منذ زمن سحيق عندما تكونت الشمس.

وهذه نقطة مهمة. فحتى رغم أن نجوم السوبرنوفا أحداث نادرة، ولم تُدرس بنفس التفاصيل مثل نجوم التتالي الرئيسي الأخرى، تتسق بالفعل الأدلة المستقاة من عمليات الرصد والنماذج النظرية مع بعضها البعض. وجاء البرهان الأكثر إثارة في هذا المجال في ١٩٨٧ عندما شوهد انفجار سوبرنوفا في سحابة مجلان الكبرى، وهي إحدى منظومات النجوم المصاحبة لدرب اللبّانة. وكان هذا النجم السوبرنوفا هو الأقرب الذي يتم رصده منذ اختراع التلسكوب الفلكي، وتم توجيه كل جهاز فلكي متاح إليه لدراسة هذا الحدث وآثاره.

وأطلق على هذا الحدث من النوع ٢ اسم **SN 1987A** ؛ لأنه كان أول سوبرنوفا يتم رصده في ١٩٨٧، وكان انفجاراً لنجم ذو كتلة تتراوح بين ١٧ و١٨ كتلة شمسية (وهذا هو السبب الذي جعلني أقدم هذا الحجم في المثال أعلاه)، على بعد نحو ١٦٠٠٠٠ سنة ضوئية من مكاننا (لذلك ففي وقت رؤيتنا لانفجار السوبرنوفا كان النجم الواقعي قد ختفى منذ ١٦٠٠٠٠ سنة ضوئية). ويتسق سلوك السوبرنوفا بشدة مع التنبؤات المعتمدة على نماذج الكمبيوتر وملاحظات الرصد لنجوم السوبرنوفا الأكثر بعداً خلال سنوات، ولكن ليس اتساقاً كاملاً، لذلك تظل الحاجة ماسة لمزيد من تطوير تلك النماذج، لكنه

اتساق على درجة عالية بما يكفي للتأكد من أن التصور الذي قدمته لك تصور صحيح في خطوطه العامة. وكان في استطاعة الراصدين التعرف على النجم الذي انفجر في ألواح المتابعة الفوتوغرافية، التي التقطت قبل انفجاره، ومن ثم استطاعوا معرفة الطبيعة التي كان عليها هذا النجم بالضبط (وبهذه الطريقة عرفنا كتلته). وكجائزة إضافية ضخمة، كان هناك بالصدفة البحتة عدة تجارب يتم إجراؤها على الأرض في نفس الوقت الذي شوهد خلاله نجم السوبرنوفا بحيث أمكنها رصد نيوترينوات من الفضاء. وعند تحليل بيانات هذه التجارب (بعد مشاهدة السوبرنوفا)، أوضحت أنه تم توقيف حفنة من النيوترينوات قادمة من الانفجار بأجهزة الرصد على الأرض، عند أقل من ثلاث ساعات قبل مشاهدة السوبرنوفا وهو ينفجر. وكان هذا إثبات مهم بأن جسيمات النيوترينو من القلب المنفجر قد انطلقت خارجة من خلال الطبقات الخارجية للنجم، مدعمة الصدمة خلال مسارها، وفلتت إلى الفضاء قبل وصول موجة الصدمة إلى المناطق الخارجية للنجم. وتتيح جسيمات النيوترينو هذه نافذة مباشرة للإطلال على الأحداث خلال انهيار قلب النجم.

وتتيح لنا أيضاً طريقة جديدة لمحاولة تصور العدد الضخم لجسيمات النيوترينو التي تنطلق في القلب المنهار. فإذا أضفنا تحول البروتونات إلى نيوترونات إلى العمليات الأخرى التي تحدث في القلب المنهار، يُنتج السوبرنوفا **SN 1987A** نحو 10^{58} نيوترينو. تصور هذه الجسيمات وهي تنتشر مندفعة إلى كافة الاتجاهات في الفضاء، كما لو كانت قشرة كرة تتمدد حول السوبرنوفا. وبعيداً عن الأرض يمكن لهذه الجسيمات أن تملأ قشرة سمكها نحو ١٠ ثوان ضوئية ونصف قطرها ١٦٠٠٠٠ سنة ضوئية. وحتى مع هذا السمك الرقيق، يظل هناك في المسافة بين الأرض والسوبرنوفا مكان لعدد ١٠٠ مليار نيوترينو لكي يمر خلال كل سنتيمتر مربع من سطح الأرض (وخلال كل سنتيمتر مربع من جسمك) إلى الفضاء في ١٠ ثوان. وتقاوم جسيمات النيوترينو بشدة التفاعل مع المادة العادية حتى أنه رغم كل هذا الفيض من الجسيمات، يحدث في المتوسط أن يوقف جسم شخص واحد من بين كل ألف شخص، من التعداد الكلي للأرض، نيوترينو واحد قادم من **SN 1987A**. وبالفعل لم يتوقف في أجهزة الرصد المخصصة لاصطياد مثل هذه الجسيمات سوى ٢٢ نيوترينو فقط من

السوبرنوفا - لكن هذا أكثر مما يتطلبه الأمر لفهم كيفية عمل السوبرنوفا (وجسيمات النيوترينو). ومما يدعم إثبات دقة نماذج كيفية تكوين النجم النيوتروني، أن نبض جسيمات النيوترينو التي وصلت تنتشر على امتداد ١٢ ثانية فقط، وهو ما يقترب إلى درجة كبيرة من مدى انهيار القلب.

ومن جانب آخر فحتى هذا لم يكن أفضل دليل من ملاحظات الرصد التي جاءت من SN 1987A، من وجهة نظر علماء النظريات الذى قضوا عقوداً وهم يدرسون كيفية إنتاج العناصر الكيميائية داخل النجوم وانتشارها فى درب اللبّانة. فطبقًا للنظرية القياسية للسوبرنوفا، التى تمت صياغتها قبل مشاهدة انفجار SN 1987A، فإن أغلب الطاقة المنبعثة فى مجملها من السوبرنوفا على هيئة ضوء مرئى خلال المائة يوم الأولى من حياة النجم تأتى من تحلل كوبلت - ٥٦، الذى تم إنتاجه فى المراحل المبكرة التالية للانفجار، إلى حديد - ٥٦. تذكّر أن هذه هى الخطوة الثانية فى العملية التى تتضمن خطوتين؛ حيث أن العنصر بالغ الوفرة من مجموعة الحديد، والذى ينتج مباشرة من الانفجار نفسه، هو نيكل - ٥٦، الذى يتحلل فى مقياس الزمن الأسى المعتاد، بنصف عمر بما يتجاوز بقليل ستة أيام لإنتاج كوبلت - ٥٦. ويتحلل الكوبلت - ٥٦، وله نصف عمر ٧٨ يوم، ثم يهيمن على إنتاج الطاقة فى بقايا السوبرنوفا الذى يضمحل خلال الأشهر القليلة الباقية. ويوضح الشكل التفصيلى لمنحنى الضوء للنجم SN 1987A أنه فى أول مائة يوم بعد الوصول إلى قمة السطوع، تم إنتاج ٩٣ فى المائة من الطاقة بالفعل بواسطة تحلل كوبلت - ٥٦ .

ما هى كمية الكوبلت التى تشارك فى هذا التحلل؟ يوضح تحليل اضمحلال منحنى الضوء للنجم SN 1987A ، أنه يُنتج فى مجمله كتلة كوبلت - ٥٦ تكافئ نحو ٧ فى المائة من كتلة شمسنا، أو أكبر ٢٣٠٠٠ مرة من كتلة الأرض - وهو ما يبدو مدهشًا إلا إذا تذكرت أن الكتلة الكلية للنجم فى نهاية حياته كانت نحو ١٥ كتلة شمسية. من هنا فإن الجزء الذى تحول من كتلته إلى كوبلت - ٥٦ مشع، وحافظ على سطوع السوبرنوفا خلال دراسة علماء الفلك له على الأرض، كان نصف الواحد من مائة فقط من كتلة النجم نفسه. ومرة أخرى نقول إن هذه النتائج تتسق مع التنبؤات التى جاء بها علماء النظريات.

وتواصلت عمليات رصد السوبرنوفا المضمحل خلال التسعينيات - وبالفعل مازالت هذه العمليات مستمرة - واستمر هذا التحلل الأسى ببطء حتى يناير ١٩٩٠، بعد ٥٠٠ يوم من أول رصد للسوبرنوفا، عندما بدأ النجم يضمحل بسرعة أعلى. ولا بد أنه كانت هناك كمية من الكوبلت - ٥٦ فى ذلك الوقت، مازالت تتحلل إلى حديد - ٥٦ . وتفسير ذلك أن هذا الخفوت فى الضوء القادم من السوبرنوفا يدل على وقت بداية تكثف الجسيمات الصلبة الدقيقة من المادة الهائلة المتمددة التى انبعثت من موقع الانفجار، لكى تشكل نوعًا من سناج الحبيبات الدقيقة التى منعت بعض الضوء. ونقول من جديد إن هذا بالضبط ما تنبأت به النماذج. وأصبح الموقف الآن أخيراً، بعد نحو ألف يوم من مشاهدة انفجار السوبرنوفا، أن منحنى الضوء بدأ يعتدل فى طريقه لأن يهبط بالتدريج. ويدل ذلك على الوقت الذى تحللت فيه غالبية الكوبلت - ٥٦ إلى حديد - ٥٦ مستقر، وأصبح مصدر الطاقة المتصل أكثر ندرة فى بقايا السوبرنوفا. لكنه أصبح أطول عمراً، وهو النوى المشعة مثل كوبلت - ٥٧ (بنصف عمر ٢٧١ يوم) وتيتانيوم - ٤٤) بنصف عمر نحو ٤٧ عام). ولكى نتصور مصدر الطاقة هذا علينا أن نعرف أنه رغم مرور ٧٠٠ يوم من مشاهدة انفجار السوبرنوفا كانت البقايا النجمية تلمع بشكل أكثر خفوتًا مقارنة بما كانت عليه فى الأيام الأخيرة من عمرها كعملاق، قبل الانفجار مباشرة.

وخلال عمليات الرصد لخفوت الضوء الناتج، كان على علماء الفلك أن يشاهدوا أيضا الضوء من الطبقات المتتالية للنجم وهى تُطرد فى الفضاء، موجة تلو موجة فيما يشبه رقصة كونية، واستطاعوا دراستها بمنظار الطيف. وأظهرت هذه النتائج بشكل مباشر وجود نيكل - ٥٦ ، فى الأيام القليلة الأولى بعد مشاهدة انفجار السوبرنوفا، وأثبتت أن كتلة نيكل - ٥٦ تساوى ٨ فى المائة من كتلة شمسنا تم إنتاجها فى السوبرنوفا، وهو ما يقترب جداً من التنبؤات النظرية. وأظهرت الدراسات الطيفية أيضا وجود الباريوم، والاسترنتيوم والإسكنديوم - وكلها عناصر من العملية - س التى تم إنتاجها قبل أن يصبح النجم سوبرنوفا، والتى طُردت الآن إلى الفضاء.

وكان الاتساق بين ملاحظات الرصد وتنبؤات النماذج النظرية بالغ الأهمية حتى إنه لم يدع مجالاً للشك فى أن العناصر تم إنتاجها بالفعل داخل النجوم ثم انتشرت

فى درب اللبّانة خلال انفجارات السوبرنوفا، وبذلك نكون قد فهمنا ليس فقط الخطوط العريضة للعملية ولكن كمية مناسبة من التفاصيل حول ما يحدث. ولا تكتفى بتصديق حديثى. لقد حافظ روجر تايلور على اهتمامه بأصل العناصر بعد عمله مع هويل فى بداية الستينيات، واحتل مركزاً مهماً فى مجال التغير فى التركيب الكيميائى لمجرة درب اللبّانة بعد طبخ العناصر داخل النجوم ونشرها فى الفضاء. وانتقل فى وقت لاحق فى الستينيات إلى جامعة سوسيكس حيث قضى ما تبقى له من سنوات فى تخصصه، وحيث تعلمت منه أغلب ما عرفته حول عملية التركيب النووى وتطور العناصر. وقال لى فى بداية التسعينيات بأنه يرى أن عمليات الرصد بمنظار الطيف للمادة المطرودة من SN 1987A، مضاف إليها الشكل التفصيلى لمنحنى الضوء المنحدر كان "أهم (ما راه فى أى وقت) وأكثره إثارة فى مجال أصل العناصر، مما يثبت أن النموذج النظرى صحيح إلى حد بعيد".

عرفنا الآن من أين أتت العناصر، ولماذا توجد بهذه الكميات فى الكون. ولكن كيف أتت من نجوم السوبرنوفا إلى نجوم مثل الشمس وكواكب مثل الأرض وأصبحت بشراً مثلنا؟ ويأتى الحل من الطريقة التى تلاشى بها نجم SN 1987A فجأة فى بداية عام ١٩٩٠؛ حيث أصبح مغطى بشرنقة من الحبوب الصلبة للمادة – غبار النجوم.

الفصل التاسع

نثر البذور

يعتبر غبار النجوم مفتاح لغز وجود جزيئات معقدة فى الكون، وبالتالى وجود الحياة نفسها. وتنتج الجزيئات الدقيقة الصلبة من المادة المطرودة من النجوم - سيان تم ذلك بشكل تدريجى، كما هو الحال مع العملاق الأحمر الذى ينثر طبقاته الخارجية، أو بشكل عنيف، فى حالة انفجار النوفا والسوبرنوفا - معرفة بالمواقع التى يمكن أن تنشط فيها كيمياء ما بين النجوم والبذور التى تحمل هذه الجزيئات المعقدة الناتجة عن جزء من المجرة إلى جزء آخر. ولم يتم إدراك هذه الأمور بشكل كامل إلا بعد أن طور علماء الفلك معرفتهم بكيفية تكوين العناصر. ولم تُعرف الجزيئات المعقدة فى الكون إلا فى أواخر الستينيات فقط، أكثر قليلاً من ثلاثين عاما مضت، بما فى ذلك بصماتها الطيفية بأطوال الأمواج الراديوية. وكانت المعرفة الأولى بالنشادر وبخار الماء مثيرة، لكنها غير مدهشة تماماً (وتم اعتبارها مجرد جزيئات متعددة الذرات، بأربع ذرات فى كل جزىء نشادر NH_3، وثلاث فى كل جزىء ماء H_2O). وبهذه الطريقة عُرف الجزىء العضوى الفورمالدهايد فى ١٩٦٩، وتشير كلمة "عضوى" إلى أن الجزىء يحتوى على كربون (صيغته الكيميائية H_2CO)، وأنه أيضًا جزىء يصاحب ظهور الحياة على الأرض، لبنة بناء كيميائية تظهر كوحدة تحتية فى أغلب الجزيئات العضوية المعقدة، بما فى ذلك أنواع السكر التى تلعب دورا فى عمليات الحياة النشطة فى أجسامنا.

وكان وجود الفورمالدهايد فى السحب الباردة من الغاز والغبار فى الفضاء يعد باحتمال وجود تعقد ثرى لكيمياء ما بين النجوم، وأوفت الاكتشافات المتتالية بهذا الوعد، وتم التعرف إلى أكثر من مائة جزىء متعدد الذرات فى الفضاء، يحتوى الكثير

منها على مزيد من الذرات أكثر من تلك الموجودة في الفورمالدهايد. تحتوي على سلاسل يرتبط فيها أكثر من ١١ ذرة كربون على هيئة صف، مع ذرة هيدروجين على أحد الأطراف وذرة نتروجين على الطرف الآخر، وحلقات تعرف باسم هيدروكربونات عطرية متعددة الحلقات PAH، ومركبات مألوفة مثل الكحول الإثيلي وحامض الفورميك وسيانيد الهيدروجين. وتعتبر جزيئات PAH ، التي يشار إليها أحيانًا على أنها هيدروكربونات متعددة العطرية، ذات أهمية خاصة لأنها جزيئات الهيدروكربون الأكثر استقرارًا في الشروط التي توجد في سحب ما بين النجوم. وهي جزيئات ضخمة حتى إنها تسمى جزيئات كبيرة [٦٤] ، ويتكون كل منها من عدة حلقات تحتوي كل حلقة على ست ذرات كربون، لتصبح على هيئة سداسيات صغيرة تربط معا من أطرافها، وقد يصل عدد ذرات الكربون المترابطة معا إلى مائة أو أكثر، وذرات الهيدروجين مثبتة حول الأطراف الحرة للحلقات الخارجية. ويُكتشف سنويا نوع أو نوعان جديدان من الجزيئات متعددة الذرات ما بين النجوم. لكن كيف تشكلت هذه الجزيئات؟

من السهل نسبيا إنتاج بعض الجزيئات الأكثر بساطة من مزيج من الغازات – فالهيدروجين والأكسجين مثلاً يتفاعلان بحماس شديد لتكوين الماء. لكن بعض الجزيئات الأخرى يحتاج إلى سطح لكي يلتصق عليه، مثل الحبيبات الدقيقة للكربون (على هيئة جرافيت)، التي تلتقط الذرات من السحابة خلال تحركها في الغاز. وتلتصق الذرات بسطح الحبيبة ويمكنها أن تتفاعل مع بعضها البعض بسهولة تامة. وإذا بدأ جزيء متعدد الذرات يتشكل في الغاز نفسه، يمكن لصدمة تأتيه من ذرة أخرى سريعة الحركة أن تجعله ينفصل عن بعضه البعض. لكن الأمر يختلف على سطح حبيبة الغبار حيث لا يميل الجزيء الموجود عليها لأن ينفصل عن بعضه البعض إذا صدمته ذرة أخرى، لأن الحبيبة نفسها تمتص الصدمة، وتتيح للذرة الآتية فرصة أن تلتصق بالجزيء النامي.

(٦٤) جزيء كبير macromolecule : مثل البروتين المحتوي على وحدات صغيرة مترابطة مع بعضها (المترجم).

وكان علماء الفلك يعرفون منذ زمن طويل بوجود كميات ضخمة من الغبار في كثير من السحب البادرة للمادة في الفضاء، وأتاحت الملاحظات المستقاة من منحنى الضوء الهابط للسوبرنوفا SN 1987A إثباتًا قويا لذلك. لكن وجود كل هذا الغبار حول سوبرنوفا فتي من النوع ٢ كان أمراً مثيراً للدهشة للوهلة الأولى.

ويتمثل اللغز في أنه تحت الشروط الموجودة في الفضاء، يكون الخليط النشط من الكربون والأكسجين نهماً للتفاعل، ويتحد العنصران مع بعضهما البعض لتكوين غاز أول أكسيد الكربون CO . فإذا انطلق هذا المزيج من الكربون والأكسجين من نجم ما، فمن الواجب استخدام العنصر الأقل وفرة بكامله في هذا التفاعل، مع ترك الباقي من العنصر الآخر حرا لأن يشارك في أي تفاعلات كيميائية. وفي النجوم التي تطرد كمية ضخمة من الكربون وكمية صغيرة فقط من الأكسجين، من الطبيعي أن نتوقع وجود غبار كربون نتيجة لذلك. لكن في النوع ٢ من السوبرنوفا، مثل SN 1987A، يتم إنتاج كمية أضخم من الأكسجين مقارنة بالكربون – فلماذا لا يتم استهلاك كل الكربون في جزيئات أول أكسيد الكربون؟ يبدو أن الإجابة تتمثل في أن أي جزيئات أول أكسيد الكربون تكونت في غلاف المادة المنطلقة بعيداً عن السوبرنوفا قد تم القضاء عليها بواسطة الإلكترونات عالية الطاقة (أشعة بيتا) الناتجة عن التحلل الإشعاعي للكوبلت – ٥٦ الذي حافظ على سطوع السوبرنوفا كل هذ الوقت الطويل. ويتيح ذلك لذرات الكربون فرصة للتكثف لتشكيل حبيبات غبار جرافيت، حتى لو كان هناك أكسجين أكثر بكثير من الكربون في بقايا السوبرنوفا. لكن هذ الغبار يكون دقيقًا بالفعل، ويكون حجم الجسيم الواحد من غبار ما بين النجوم مماثلاً لحجم الجسيمات الصلبة في سحابة دخان سجائر.

ولا شك في أن هذه القطع بالغة الصغر من بقايا السوبرنوفا تتكون في النجوم ثم تنتشر عبر المجرة، وهي تصل حتى إلى الأرض، حيث تمسك الأحجار النيزكية قبل سقوطها على الأرض بقطع الحبيبات الصغيرة هذه. وتكون الأجزاء الصغيرة من الحبيبات بالغة الصغر – وقد يصل حجمها بالفعل إلى عدة ميكرومترات (أي بضع أجزاء من ألف من المليمتر) ورغم ذلك يمكن عمل شرائح منها وتحليل مكوناتها، ولقد

وُجد أن كثيراً منها يحتوي على مجرد نسب من النظائر التي تنبأت بها النماذج النظرية فيما يتعلق بالمادة التي طُبخت داخل النجوم. ومثال لذلك، يُعتبر اتحاد نسب عالية من نظير كربون – ١٢، ذو صلة بكربون – ١٣، مع مقدار ضئيل من سليكون – ٢٨، دليلاً واضحًا على تكوُّن جزيء جرافيت فور حدوث انفجار السوبرنوفا. ورغم أن الجزيئات صغيرة بحيث لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة، فإنه يمكن رؤيتها تحت الميكروسكوب، بل يمكن لمسها، من حيث المبدأ – أي يمكن الإمساك بقطعة من البقايا الخالصة للسوبرنوفا في يدك، حتى لو لم تشعر بأنها كامنة في يدك.

بل يمكنك التصرف بشكل أفضل إذا لجأت إلى الطرق المناسبة. قد لا يكون بعض حبيبات الكربون بالغة الصغر التي توجد في عينات من مادة آتية من الفضاء، على هيئة جرافيت، لكن على هيئة ماس. وبللورات الماس شكل من أشكال الكربون يتم إنتاجه تحت ضغط هائل – وهناك بالفعل بعض القواعد العلمية في قصص سوبرمان عندما يحول كمية من الفحم العادي إلى ماس بأن يعتصرها بشدة بيده بالغة القوة. وبللورات الماس القادمة من الفضاء تكون نتيجة الاعتصار الهائل لحبيبات الجرافيت في مناطق من قشرة السوبرنوفا المنفجر حيث يصل الضغط خلال فترة زمنية قصيرة إلى حدود قصوى من الشدة عند مرور موجات الصدمة بهذه القشرة. وهذا دليل على مدى حساسية ودقة أجهزة القياس التي يستخدمها علماء الفيزياء في الوقت الراهن حتى صار متاحًا التأكد من صحة هذا التفسير عن أصل الماس، بتحليل بقايا من عنصر الزينون الموجود في الماس – حتى على الرغم من أن هذه المادة نادرة إلى درجة أن حبيبة ماس واحدة في كل مليون تحتوي بالفعل على مجرد ذرة واحدة من الزينون. ولا يمكن تكوين مزيج نظائر الزينون الموجودة في الماس بواسطة أي عملية نووية واحدة، لكنه هو بالضبط الخليط المتوقع من اتحاد منتجات العملية – ب والعملية – ر. وحيث إن النظرية تقول لنا إن هاتين العمليتين تحدثان عند مستويين مختلفين في السوبرنوفا المنفجر، فإن الاكتشافات تقول لنا أيضا إن المادة الآتية من السوبرنوفا تكون قد اختلطت تماما خلال الانفجار. وتؤكد الدراسات على الماس القادم من الفضاء على مدى نجاح علماء الفيزياء الفلكية في فهم انفجارات السوبرنوفا، كما تؤكد أن حبيبات غبار النجوم (وهي في حالتنا هذه الحبيبات التي يمكن أن تلمع مثل النجوم الصغيرة) يمكنها أن تعبر الفضاء وتصل إلى المادة التي تتكون منها منظومات النجوم والكواكب الجديدة. وبيئة ما بين النجوم غنية بدون شك بالمواد التي [illegible] معالجتها

داخل النجوم. ولكن ما كمية هذه المادة الموجودة في مجرة مثل مجرتنا، درب اللبّانة؟ "الفضاء الخالي" ليس خاليا في الواقع، حتى لو كنا نتحدث عن فراغ على درجة من الخلو من الذرات والجزيئات أكثر بكثير من "الفراغ" الذي يحصل عليه علماء الفيزياء في مختبراتهم هنا على الأرض. وفي المتوسط يكون هناك ذرة هيدروجين واحدة في كل سنتيمتر مكعب في الفضاء ما بين النجوم في مجرة درب اللبّانة. ويمكننا أن نرى في بعض الأماكن سحب سوداء من الغبار، تحجب الضوء الآتي من النجوم خلفها، حتى إنها تبدو كما لو كانت أنفاق مظلمة في درب اللبّانة. ولأن هذه السحب المظلمة باردة (لا تتجاوز درجة حرارتها ١٠ – ١٥ كلفن)، أي نحو ٢٦٠ درجة تحت الصفر على القياس المئوي) فإنها لا تشع الكثير من الطاقة. لكن لها دور مهم تؤديه في قصة كيمياء ما بين النجوم.

وعلى الرغم من أن هذه السحب على تلك الدرجة من البرودة في الوقت الراهن، تكونت الحبيبات فيها من مادة ساخنة جدا عقب انفجار السوبرنوفا (وربما نتيجة العديد من انفجارات السوبرنوفا، التي اختلطت بقاياها تماما الآن). ولأن الأكسجين هو أكثر العناصر شيوعًا بعد الهيدروجين والهليوم، من السهل تماما أن تتكون الأكاسيد في الخليط الأصلي للمادة، التي تتصلد بدورها – تتغير مباشرة من الحالة الغازية إلى الحالة الصلبة – مع برودة الغاز. وسلوك الأكاسيد تحت تأثير هذه الظروف معروف تمامًا في الأبحاث التي تجرى في المختبرات هنا على الأرض، ونعرف أن جزيئات أكسيد الألمنيوم هي أول ما يتكثف بهذه الطريقة، ثم تتبعها أكاسيد الكالسيوم والتيتانيوم والنيكل والحديد والمغنسيوم والسليكون.

وعلى الرغم من أن أكاسيد السليكون ليست هي أول ما يتكثف، فإن السليكون يلعب دوراً خاصًا فيما يلي ذلك، لأنه أولاً عنصر شائع جدا بمقاييس فضاء ما بين النجوم (رغم أنه ليس في شيوع CHON)، وثانيًا لأن أكاسيد السليكون يمكنها أن تتحد مع أكاسيد مواد أخرى موجودة لتكوين حبيبات السليكات [٦٥]. ويحتوي جزيء السليكات على مجموعة من ذرة سليكون واحدة وأربع ذرات أكسجين مرتبطة معا

(٦٥) السليكات silicate : من المركبات التي تحتوي على سليكون وأكسجين وعنصر واحد أو أكثر من المعدن. (المترجم)

لتكوين مجموعة سليكات SiO_4، التى قد ترتبط بذرات معدن (مثل الألمنيوم أو المغنسيوم) فى السليكات، والتى تتفاعل أيضًا كوحدة منفردة فى تفاعلات كيميائية كثيرة. والسليكات شائعة فى الفضاء لنفس السبب الذى يجعل الأكسيدات شائعة – هناك إمداد وافر من أكسيدات السليكون هنا وهناك يجعلها تتحد حتى مع كل الأكسيدات الأخرى تقريبًا (ما عدا أول أكسيد الكربون) وتربطها على هيئة سليكات. وأحد الأدلة على ذلك أن السليكات تمثل نحو ٩٠ فى المائة من مادة صخور القشرة الأرضية – وهذا رباط آخر بيننا وبين الأصول الكونية.

وبالإضافة إلى حبيبات الجرافيت تعتبر السليكات ذات أهمية خاصة فى المرحلة الثانية من التبريد عقب انفجار السوبرنوفا، عندما تتكون أغلفة ثلجية حول الحبيبات الصلبة. و"ثلجية" تعنى كل أنواع الجليد، ليس فقط الماء المتجمد لكن الميثان المتجمد والنشادر المتجمد وحتى أول أكسيد الكربون المتجمد. وهو بالتحديد هذا الخليط المتجمد من أنواع الجليد المختلفة، والملتف حول قلب مادة جرافيت أو سليكات، الذى يسلك مثل أنبوب اختبار باردة بالغة الصغر حيث تتم التفاعلات الكيميائية التى تصنع تشكيلة الجزيئات متعددة الذرات الموجودة فى الفضاء. وعلى الرغم من أن الجسيمات المثلجة تكون بالغة البرودة حينئذ، تأتى الطاقة اللازمة للتفاعلات الكيميائية من الأشعة فوق البنفسجية القادمة من النجوم – وهو ما تنبأت به النظرية وأثبتته التجارب التى أجريت فى الثمانينيات حيث تم حفظ حبيبات سليكات بالغة الصغر فى نفس هذا النوع من المادة المثلجة، باردة عند درجة ١٠ كلفن، وإطلاق دفعات من الضوء فوق البنفسجى عليها.

لكن السحب الباردة لا تحكى كل قصة ما يحدث بين النجوم. وفى أماكن أخرى تسطع السحب الساخنة؛ لأن الإشعاع من النجوم القريبة يرفع حرارتها إلى نحو عشرة آلاف درجة (بالنسبة إلى مثل هذه الدرجات لن يكون هناك فارق ملحوظ بين أن نقيس بدرجات كلفن أو الدرجات المئوية)، ويتيح الإشعاع من هذه السحب الساخنة سهولة نسبية فى استكشاف خواصها، التى تشير إلى وجود كثير من الجزيئات متعددة الذرات وتوضح لنا أن السحب تحتوى على عشرات الآلاف من الذرات فى كل سنتيمتر مكعب. ضع فى اعتبارك أن ذرات الهيدروجين تمثل مقدارًا كبيرًا من مكونات سحابة ما بين النجوم، بغض النظر عن مدى ثرائها بغبار النجوم

وتحتوى مادة ما بين النجوم فى المجرة على كتلة تصل إلى نحو ١٠ فى المائة من كتل النجوم الساطعة فى المجرة إذا جُمعت معًا [٦٦]. وحيث إن هناك عدة مئات من مليارات النجوم فى درب اللبَّانة، كثير منها أو قليل يشبه الشمس، فإن هذا يحدد الكتلة الكلية لمادة ما بين النجوم، مع بالغ التحفظ، فى حدها الأدنى بمقدار ١٠ مليارات كتلة شمسية. وهى وفرة تجعل ظهور نجوم جديدة غير جدير بوضعه فى الحسبان. وعليك أن تدرك أنه حتى مع تكوين ١٠ مليارات نجم جديد من مادة فضاء ما بين النجوم، فإن هذا لا يمثل استنفادًا للإمدادات، لأن مادة ما بين النجوم تتجدد وتجد دعمًا من انفجارات النجوم والكتل التى تفقدها النجوم العملاقة. ومع ذلك لا بد من وجود نقص مستمر سيان قل أو كثر فى كمية المادة ما بين النجوم هنا وهناك، لأن بعضًا منها يتحول إلى نوع من النجوم القزمية البيضاء، أو النجوم النيوترونية (أو حتى الثقوب السوداء)، ولا يمكن إعادة تدويرها. ولكن منذ مليارات السنوات الماضية وخلال مليارات السنوات المقبلة، تعتبر هذه العملية عملية إعادة تدوير بالفعل، أكثر من كونها مجرد استخدام للإمدادات الأصلية من المادة الخام.

وهناك تشبيه لطيف يمكن تقديمه يتمثل فى قدر ضخم ملىء بحساء الخضراوات يُطهى على موقد. وتبدأ العملية بمجرد ماء فيه مادة واحدة (قد تكون الجزر). ويأخذ شخص ما سلطانية مليئة بالحساء، وفى مقابل ذلك يضعون مادة أخرى – قد تكون الطماطم – ويضيفون قليلاً من الماء (لا تساوى كميته ما يأخذونه من حساء). وبمرور الوقت يتقدم مزيد من الناس يتناولون بأنفسهم ما يشاءون من الحساء ويرمون بشىء فى القدر، لكن النتيجة دائمًا سحب مزيد من المادة أكثر مما يعود إلى القدر. ويهبط مستوى الحساء فى القدر ببطء، وفى النهاية يصبح القدر خاليًا. لكن خلال هذه العملية يصبح الحساء أغنى وأغنى، مع إضافة تشكيلة كبيرة من المواد، ولا يكون الحساء فى سلطانية هو نفسه أبدًا فى السلطانية التالية لها. وبطريقة مشابهة فإن النجوم الأولى

(٦٦) أتناول هنا فقط نوع المادة التى صُنعت منها النجوم والكواكب والبشر، والتى تحتوى على العناصر الكيميائية المألوفة. وهناك أدلة أيضًا على وجود نوع آخر من المادة فى الكون، يُطلق عليها "المادة السوداء"، وقد يكون قرص درب اللبَّانة مطمورًا بمادة سوداء موزعة على هيئة كرات ضخمة. لكنها لا تلعب دورًا فى القصة التى أحكيها هنا.

كانت مصنوعة من الهيدروجين والهليوم فقط، ثم انفجر بعضها وأثرى بيئة ما بين النجوم (ولم نتعرف فى الواقع أبدا على هذه النجوم البدائية، ولا بد أنها اندثرت قبل أن تولد حتى النجوم الأقدم التى نراها فى الوقت الراهن). وكان الجيل الثانى من النجوم مصنوعاً من مادة أكثر ثراء بقليل، وتكررت العملية عدة مرات حتى أصبح لدينا فى الوقت الراهن نجوم مثل الشمس، متكونة منذ نحو ٤,٥ مليار سنة مضت من مادة ما بين النجوم التى ازدادت ثراء عن طريق عدة أجيال من النجوم المنفجرة، خلال فترة زمنية طويلة (عمر درب اللبّانة أكثر بقليل من ١٠ مليارات سنة).

وتعتبر العملية بطيئة جدا بالمقاييس البشرية. وتُقدر كمية المادة ما بين النجوم التى يُعاد استخدامها فى نجوم جديدة كل عام فى درب اللبّانة فى الوقت الراهن أقل من نحو ١٠ كتل شمسية. وحيث أن أغلب النجوم أصغر من الشمس، يمكن القول بالتقريب أنه ما بين ١٠ و٢٠ نجماً جديداً تتوهج فى مجرتنا كل سنة. ولكن فى عشرة مليارات سنة، فإن هذا يعنى أن ١٠٠ مليار كتلة شمسية من المادة، ربما تصل إلى ثلث كتلة كل النجوم فى مجرتنا فى الوقت الراهن، وإلى عشرة أضعاف كتلة مادة ما بين النجوم الحالية، قد أعيد تدويرها بهذه الطريقة. وكل ما يحتاجه هذا الأمر أن يتم قذف نحو ١٠ كتل شمسية من المادة المعاد تدويرها من النجوم من المجرة كلها كل عام – إما على شكل رياح نجمية من العمالقة الحمر، أو انفجارات سوبرنوفا نادرة _لتحل محل المادة التى تحولت إلى نجوم جديدة. ولا بد أنه كان هناك نشاط كثيف متفجر تشكلت خلاله عشرات الملايين، أو ربما مئات الملايين من النجوم معا عندما كان الكون شاباً. ويمكننا رؤية هذا النشاط المذهل وهو يحدث فى منظومات تعرف باسم مجرات النجوم المتفجرة، وتكون أحياناً نتيجة تفاعلات ذات مد وجزر بين مجرتين تمران بالقرب من بعضهما. ولكن هذا بعيد تماماً عن القصة التى أحكيها. فإذا عدنا للاقتراب من الموضوع، فإن أحد تضمينات هذه العملية المستمرة من تكون النجم وإعادة تدوير مادة ما بين النجوم هو أن بيئة ما بين النجوم فى وقتنا الراهن أكثر غنى بالفعل بالعناصر الثقيلة مقارنة بما كانت عليه عند تكوين الشمس، حتى إن النجوم التى يمكن أن تتشكل فى عصرنا الحالى قد تحتوى على تركيز مختلف من المواد الكيميائية مقارنة بالشمس. لكنها تظل دائماً هى نفس المواد – تبدأ النجوم التى تكونت عندما كانت

المجرة شابة بذرات عناصر ثقيلة أقل، مع نسبة أكبر، مثلا، من الأكسجين، مقارنة بالحديد، أكثر من النجوم التى تتشكل فى العصر الراهن. لكنها جميعًا تبدأ بكميات صغيرة جدا من نفس العناصر.

وعلى الأقل يمكننا الآن أن نرى كيف تشكلت نجوم مثل الشمس – والشمس نفسها بالطبع. ويثق علماء الفلك فى أنهم يفهمون قواعد هذه العملية، ليس لأنه يمكننا اليوم أن نراها تحدث على الأقل، فى منطقة تعرف باسم سديم الجبار [٦٧] ، وهو سحابة من الغاز الساخن والنجوم الحديثة يبعد عنا بنحو ١٣٠٠ سنة ضوئية فقط. وكما هو واضح من الاسم فإن سديم الجبار موجود فى برج الجبار، ويمكن رؤيته بالعين المجردة (بشق النفس)، وبشكل أكثر سهولة باستخدام منظار ذو عينين، على هيئة بقعة غائمة فى وسط سيف الجبار. وتم رصد أعداد كبيرة من الجزيئات متعددة الذرات فى السديم. ولأن السحابة مضاءة بواسطة النجوم الحديثة التى تطوقها، فإنها تصنع منظراً رائعاً فى الصور الفتوغرافية الفلكية، لكنها الجزء المرئى الأكثر قابلية للرؤية بالعين فيما يطلق عليه السحابة الجزيئية العملاقة، التى تغطى معظم منطقة السماء المحيطة ببرج الجبار. وأوضح علم الفلك الراديوى وعلم فلك الأشعة تحت الحمراء أن سحابة الجبار الجزيئية تحتوى على كثير من "النقاط الساخنة" التى تصاحب المراحل المبكرة فى تكون النجوم. ولا يتجاوز عمر بعض النجوم الأحدث تطوراً فى سديم الجبار نفسه مليون سنة، ويُعتقد أن الظروف فيها تشبه إلى درجة كبيرة الشروط الموجودة فى سحابة الغاز والغبار التى تكونت من خلالها منظومتنا الشمسية منذ نحو ٤,٥ مليار سنة مضت (بغض النظر، بالطبع، عن أن سحابة الجبار الجزيئية أكثر غنى بالعناصر الثقيلة، بسبب ٤,٥ مليارات سنة إضافية من التطور المجرى، مقارنة بالسحابة التى تكونت منها منظومتنا الشمسية).

إذا جمعنا بين كل أدلة عمليات الرصد وكل النماذج النظرية، يتضح لنا أن الشمس تكونت كجزء من سحابة جزيئية عملاقة، لعلها كانت تحتوى على نحو مليون

(٦٧) سديم الجبار Orion nebula : سديم مجرى لامع، أى تجمع كثيف من مادة ما بين النجوم البينية، ويُرى بالعين المجردة كإضاءة خفيفة مشتتة حول وسط نجوم السيف فى برج الجبار. (المترجم)

كتلة شمسية من المواد وكان قطرها يمتد نحو عدة مئات من السنوات الضوئية، والتى بدأت تنهار منذ نحو ٥ مليارات سنة. وهناك سحب مثل هذه السحابة تحيط بمجرة مثل درب اللبانة، لكنها تنحو إلى البدء فى الانهيار عند الأطراف المميزة للأذرع اللولبية التى تعتبر من السمات الخاصة لهذه المجرات. ويمكن رؤية هذه التشكيلات اللولبية لأن أطرافها محاطة بنجوم حديثة ملتهبة. لكن هذه النجوم توجد فى هذه الأماكن فقط لأن السمة اللولبية الأساسية هى موجة كثافة متزايدة، تكتسح كل ما حول قرص المجرة. ومن منظور النجوم فى القرص فإن كل منها يدور حول مركز المجرة فى مدار شبه دائرى، ويمكن التفكير فى موجة الكثافة على أنها منطقة كثافة عالية يمر خلالها النجم، أكثر من كونها سيارة على طريق سريع تدخل فى منطقة مرور كثيف بطىء الحركة، ثم تشق طريقها بالتدريج خلاله إلى الجانب الآخر، تاركة أزمة المرور خلفها. أو يمكن تصورها كما لو كانت لهبًا – فى لهب ولاعة السجائر ينطلق الغاز من الخزان الموجود فى الولاعة إلى الفوهة فيحترق، وتتبعثر نواتج الاحتراق خارج منطقة اللهب. ويبدو اللهب نفسه كما لو كان لا يتغير طوال وقت الاحتراق، لكن واقعيا يتم استبدال الذرات والجزيئات فى اللهب بشكل مستمرة وهى تمر خلاله.

وتؤدى الكثافة المتزايدة فى الأذرع اللولبية إلى اعتصار سحب الجزيئات العملاقة مما يجعلها تنهار وتسبب ميلاد نجوم جديدة التى تحيط حينئذ بالأذرع اللولبية، تماماً فيما يلى منطقة الكثافة القصوى. وتعيش النجوم الأكثر سطوعاً والأكثر ضخامة حياة سريعة وتموت شابة، ولا تبتعد أبداً عن مكان مولدها لكنها تعود إلى نثر بذورها فى بيئة ما بين النجوم، وتعيش النجوم الأصغر، مثل شمسنا، مليارات السنوات، وتصنع كثيراً من مناطق المجرة، وتصبح منفصلة تماما عن أشقائها، التى وُلدت معها فى نفس السحابة المنهارة. ولكن حتى مع اعتصار السحب بواسطة موجة كثافة الذراع اللولبى قد تعجز هذه السحب عن التقلص على نفس المسار الذى يؤدى إلى تكون نجوم مثل الشمس إلا إذا تلقت مساعدة إضافية. وتأتى هذه المساعدة من المادة التى تمت معالجتها والموجودة بالفعل فى السحابة – وخاصة جزيئات بخار الماء وأول أكسيد الكربون الموجودين فى الغاز، إضافة إلى الحبيبات الصلبة من الكربون نفسه

ويعود فهمنا الأساسى لكيفية انهيار وتشظى سحب الغاز فى فضاء ما بين النجوم إلى أعمال عالم الفلك البريطانى جيمس جينس فى العشرينيات. إذا أردت أن تعتصر سحابة غاز، فإن حرارتها ترتفع، وتجعلها الحرارة تتمدد فتتوقف بذلك عن الانهيار. وتوصل جينس إلى أن سحب ما بين النجوم تنهار فى حالة واحدة فقط إذا كانت لها قيمة كتلة محددة بحيث إنه بمجرد بدء الانهيار تتغلب جاذبية السحابة على الميل إلى التمدد، فتنهار بعنف، متحطمة إلى شظايا أصغر خلال الانهيار. وتعتمد الكتلة الحرجة التى تؤدى إلى حدوث هذا الانهيار – والتى تعرف باسم كتلة جينس – على كثافة السحابة (مُعرفة بالجسيمات لكل سنتيمتر مكعب) ودرجة حرارتها، مما يجعل الحسابات أكثر تعقيداً، وعلى أية حال كانت العلاقة التى توصل إليها جينس مجرد وصف تقريبى لما يحدث. لكن إذا أردنا توضيح الأمر بشكل عام فإن سحابة الغاز التى تحتوى، مثلاً، على نحو ٣٠٠٠ كتلة شمسية، ويصل قطرها إلى نحو ٤٠ سنة ضوئية ودرجة حرارتها نحو ١٠٠ كلفن، يمكن أن تنهار إلى قطر نحو ١٠ سنوات ضوئية. ولأن ذلك يرفع كثافتها، على اعتبار أنها مازالت عند درجة حرارتها الأصلية، فإنها قد تتمزق إلى عشر شظايا، كل منها ٣٠٠ كتلة شمسية، التى تنهار هى أيضاً بدورها. وكلما ارتفعت الكثافة أكثر فأكثر قد تتشظى كل سحابة بشكل متكرر وينتهى بها الأمر لأن تصبح أجراماً بحجم الشمس والنجوم الأخرى. وتولد النجوم فى المناطق الأكثر كثافة فى السحابة، حيث تتكون عُقد المادة بالغة الكثافة بحيث لا يمكن لأى إشعاع أن يفلت منها. وتسخن من الداخل، مما يجعل الانهيار يتوقف فى البداية عن الاستمرار، ثم تبدأ المادة حينئذ فى جعل هذه المناطق تتألق مثل النجوم.

ولكى تستمر هذه العملية بكاملها، يجب أن تظل درجة الحرارة مستقرة تقريباً وقت انهيار كل سحابة. ويولد الانهيار نفسه حرارة، مع انطلاق طاقة الجاذبية، لذلك يمكن للانهيار أن يستمر فى حالة واحدة : عندما يكون هناك طريقة ما لفقد هذه الحرارة من السحابة. وقد تبرد السحابة وتنهار إلى الحد الذى يجعل نجم مثل الشمس يولد، ويحدث هذا فقط إذا كان يمكنها فقد طاقة. وكانت طبيعة قدرتها على فعل ذلك لغزًا بالنسبة لجينس نفسه، وظلت لغزًا لما يقرب من خمسين سنة حتى بدأ العلماء فهم التعقد الشديد لكيمياء سحب ما بين النجوم. ومن الواضح الآن أنه يحدث فى السحب

عموماً، فى المراحل المبكرة من عملية الانهيار هذه، أن يتم التبريد بواسطة جزيئات أول أكسيد الكربون وبخار الماء. ومع ارتفاع حرارة السحب تشع فى جزء الأشعة تحت الحمراء من الطيف. وإشعاع الأشعة تحت الحمراء يخترق بامتياز مادة الغبار، ويفلت من السحابة بكاملها، فيحافظ عليها باردة. ويحدث بعد ذلك، عند مرحلة تالية من الانهيار، وعندما يبدأ تكوين النجوم الأولى، أن تظهر حبيبات الكربون. وتكون النجوم الأولى، التى تتشكل فى الجزء الأكثر كثافة فى السحابة، ضخمة وساطعة، وتشع كمية كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية، التى تنحو إلى تمزيق السحابة ومنع تشكيل مزيد من النجوم – إلا إذا تم امتصاصها فى غبار الكربون فى السحابة، وإعادة إشعاعها على هيئة أشعة تحت حمراء، على هيئة تتيح لها أن تهرب بمزيد من السهولة إلى الفضاء الخارجى. ورغم أن حبيبات الكربون تمثل ١ فى المائة فقط من كتلة السحابة، فإنها تظل تلعب دوراً مهما فى السماح لكثير من النجوم بأن تتشكل معا، بدلاً من أن تكون مجرد قلة من النجوم.

وعلى الأقل هذا ما تفعله فى وقتنا الراهن. ومن الواضح أنه عندما بدأت السحب الأولى المتكونة من الهيدروجين والهليوم البدائيين فى الانهيار، عندما كان الكون حديثاً والمجرة نفسها فى طريقها للتشكل، لم يكن أى من عمليتى التبريد هاتين موجودتين. وحيث إنه لم يبق إلى الآن أى من النجوم البدائية الناجمة عن سحب الغاز المنهارة، يمكننا فقط تخمين ما حدث – لكن التخمين تدعمه نماذج الكمبيوتر، وأقل ما فى الموضوع أننا نعرف أن هذا النجوم الأولى قد تكونت، وإلا ما كنا هنا اليوم لحل لغز كيفية تكوُّنها. ومن المؤكد إلى حد بعيد أن تلك السحب البدائية المنهارة كانت تعانى من مشاكل التشظى الشديدة، وكانت تعانى من السخونة فى باطنها، مما يجعلها تُنتج "نجوما فائقة" بالغة الضخامة تعيش حياة سريعة وتنفجر، فتبذر فى مادة ما بين النجوم أول آثار للعناصر الثقيلة. وعندما تبدأ العناصر الثقيلة فى التراكم (وبشكل خاص فى حالتنا هذه ذرات الكربون والأكسجين)، تصبح الموجات المتتالية من عملية تكوين النجم أكثر فأكثر سهولة، حيث تجد السحب أن الأمر يصبح أكثر سهولة باستمرار فى عملية إشعاع الحرارة الزائدة.

وفى الوقت الذى كانت سحابة الجزيئات العملاقة التى وُلدت منها مجموعتنا الشمسية قد بدأت فى الانهيار منذ ٥ مليارات سنة، كان مزيج مادة بينة ما بين النجوم يتكون من ٧٠ فى المائة من الهيدروجين و٢٧ فى المائة هليوم و١ فى المائة أكسجين و٠,٢ كربون و٠,١ فى المائة نتروجين ومجرد كميات بالغة الصغر من العناصر الأخرى. وكان بعض الغاز فى السحابة على هيئة أول أكسيد الكربون وبخار الماء، وكان ما بين ١ و٢ فى المائة من كتلة السحابة على هيئة حبيبات صلبة، ربعه على هيئة كربون وهيدروكربونات متعددة الحلقات وحديد، والباقى يكون فى أغلبه على هيئة حديد وسليكات المغنسيوم المغطاة بأنواع الجليد المختلفة المعقودة بواسطة الجزيئات العضوية متعددة الذرات. ويبقى فقط جزء صغير من الكتلة الكلية للسحابة – ولكن تذكر أن الكتلة الكلية للسحابة تكون مليون كتلة شمسية على الأقل. وحتى ١ فى المائة من المليون يمثل عشرة آلاف، وعشرة آلاف كتلة شمسية من الحبيبات الصلبة يساوى أكثر من ثلاثة مليارات مرة كتلة الأرض. وهذه كمية كبيرة من المادة الخام لبناء كواكب جديدة.

ولا بد أن أول نجوم جديدة، التى لها كتل عشرات أضعاف كتلة الشمس، قد تكونت خلال بضع مئات الآلاف من السنوات من بداية انهيار السحابة. وهذه النجوم هى الأسلاف الكلاسيكية للنوع ٢ من السوبرنوفا، وتقضى دورات حياتها وتنفجر خلال بضعة ملايين من السنوات، لتصبح رغوة بقايا السوبرنوفا المتمددة – فقاقيع غاز ساخن تتصادم وتتفاعل مع بعضها البعض. وفقاقيع بقايا السوبرنوفا هذه هى التى تشجع المناطق الأقل كثافة من الغاز والغبار فى السديم على الانهيار، مما يؤدى بشكل مباشر إلى تكوين نجوم مثل الشمس وكواكب مثل الأرض.

بل لدينا دليل مباشر على أن المجموعة الشمسية تكونت بهذه الطريقة، نتيجة لتأثير سوبرنوفا قريب أو أكثر من سوبرنوفا قريب على مجموعة محددة من الغاز منذ نحو ٥ مليارات سنة. وتعتبر بعض الأحجار النيزكية التى تسقط على الأرض فى عصرنا الراهن فى طبيعتها الأساسية شظايا لم تتغير من مادة تبقت من تكوين المجموعة الشمسية، كما سأوضح فوراً بقليل من التفاصيل الإضافية. فهى تمثل قطعاً

صغيرة من المادة الصلبة التي تكثفت من السديم الذي تشكلت منه المجموعة الشمسية، في الوقت الذي كانت تتكون خلاله الشمس والكواكب نفسها [٦٨] .

وأطول هذه الأحجار النيزكية عمراً، التي تنتمي إلى عائلة تعرف باسم النيازك الحجرية الفحمية [٦٩] ، يحتوي على كتل صغيرة من مادة غنية بالكلسيوم والألومنيوم والتيتانيوم والسليكون والأكسجين. وتحتوي هذه البقع عادة على وفرة غير عادية من نظائر الأكسجين والمغنسيوم، تضاهي نسب نظائر هذين العنصرين الموجودة على الأرض، مما يتيح تفسيراً لأصل هذه المادة. ويعتبر وجود المغنسيوم – ٢٦ ذا أهمية خاصة لأنه ينتج عن التحلل الإشعاعي للألومنيوم – ٢٦ ، الذي يتكون هو نفسه في السوبرنوفا، لكن تكون له نصف حياة تصل إلى ٧٤٠٠٠٠ سنة. وهذا يعني أن المغنسيوم – ٢٦ في النيازك الحجرية الحبيبية كان مستقراً هناك على هيئة ألومنيوم – ٢٦ خلال عدة مئات الآلاف من سنوات انفجار السوبرنوفا، وتحلل في مكانه ليصبح مغنسيوم – ٢٦ . ويعني أيضًا أن البقع الغنية بالكلسيوم والألومنيوم تكون عادة كتلا سليمة من بقايا السوبرنوفا، محفوظة داخل الأحجار النيزكية، التي تظل دون تغيير (باستثناء التغيرات الناتجة عن التحلل بالنشاط الإشعاعي) لمدة تقترب من ٥ مليارات سنة. وتشير دراسات النظائر على عينات الحجر النيزكي، وعلى غبار الماس الذي أشرت إليه سابقًا، إلى نفس النتيجة: أن المادة التي صنعت منها المجموعة الشمسية اصطدمت بموجة صدمة ناتجة عن مادة انطلقت من السوبرنوفا قبل أقل من مليون سنة من تكوين المجموعة الشمسية نفسها.

وفي الوقت نفسه كانت موجة الصدمة هذه تقدح انهيار البقعة الخاصة من الغاز والغبار التي تشكلت منها المجموعة الشمسية (وهي بقعة بدأت بكتلة قد تكون ٢ كتلة

(٦٨) هناك عدد كبير من الأدلة تشير إلى زمن يصل إلى نحو ٤,٥ مليارات سنة مضت حتى عصرنا الراهن كعصر لتكوين هذه الأحجار النيزكية والمجموعة الشمسية (انظر كتابي "مولد الزمن" لمزيد من التفاصيل)

(٦٩) النيازك الحجرية الحبيبية أو كوندوريت الفحمية carbonaceous chondrites = هي نيازك حجرية بكرات فحمية كثيرة وصغيرة . (المترجم)

شمسية)، وكانت تقدح انهيار بقع أخرى من الغاز والغبار قريبة منها، وعلى بعد قريب كان هناك مزيد من البقع التي تنهار تحت تأثير انفجارات السوبرنوفا الأخرى. وفي سديم الجبار، يمكن لمكعب مفترض له جوانب طول كل منها ثلاث سنوات ضوئية أن يحتوي على آلاف النجوم، يبتعد كل منها عن أقرب جيرانه، في المتوسط، بأقل من ثلث سنة ضوئية. ويشبه ذلك تمامًا الظروف التي تشكلت فيها المجموعة الشمسية حسب معرفتنا – ومازال الوضع حتى عصرنا الراهن أن أقرب جار نجمي إلى الشمس يزيد بعده عن أربع سنوات ضوئية، لذلك فإن مكعبًا تكون أطوال جوانبه ثلاثة سنوات ضوئية، ومركزه في الشمس، لن يحتوي على أية نجوم أخرى بالمرة. ولكن بما أن وفرة من منظومات النجوم "وربما" الكواكب ظهرت من الإعصار العظيم منذ ٤ مليارات سنة مضت، فإنني سوف أركز اهتمامي من الآن فصاعداً على منظومة واحدة تهمنا بشكل خاص، ألا وهي مجموعتنا الشمسية.

من المحتم على كل كتلة خفيفة من الغاز أن يكون لها دوران، أيا كان. ومع انهيارها وتحولها إلى حجم أصغر، يجعلها ذلك تهبط لولبيا بسرعة أكبر. ويرسخ الدوران اللولبي (أو كمية الحركة الزاوية) عملية استقرار المادة على هيئة قرص ضخم حول النجم وهو في طريقه إلى التكوُّن، بدلا من أن تسقط هذه المادة في المركز. وفي المراحل المبكرة من الانهيار، تتقلص كل كرة الغاز بعامل يقترب من مائة ألف، وتعني طريقة عمل الحركة الزاوية أن ذلك يرفع من سرعة حركة المادة حول مركز النجم الذي يتكوَّن، بعامل مائة ألف أيضًا. وفي وقت توازن جرم ساخن مركزي على هيئة نجم أحمر لامع، يحيط به قرص ضخم من الغبار والغاز، بينما يتساقط على القرص المزيد من الغبار والغاز وعلى النجم المركزي من كل الجهات.

تذكَّر أن نحو ١ – ٢ في المائة تقريبًا من المادة في القرص تتكون من الغبار والباقي غاز. لكن كمية كبيرة من الغاز سيكون مصيرها الانفجار بواسطة حرارة النجم الحديث، لتشكل نوعًا من الريح النجمية، بينما يظل الغبار موجوداً في القرص ويكون القرص ضخمًا في البداية لأنه يكون ساخنًا ، وتحمل المادة المتساقطة عليه من أعلى ومن أسفل طاقة حركية، تتحول إلى حرارة في القرص المتحرك مثل الدوامة ويحافظ الغاز الحار على جسيمات الغبار معلقة مثل الدخان في الهواء، وهي تتلقى

ضربات الجزيئات سريعة الحركة من كل جانب. وخلال فترة زمنية تستغرق نحو مائة ألف سنة، تتباطأ حركة مادة الجزء الداخلي من القرص بواسطة الاحتكاك وتسقط داخل النجم الحديث، بينما تتسارع المادة في الجزء الخارجي من القرص (بحيث يتم الحفاظ على كمية الحركة الزاوية في مجملها) وتندفع بقوة إلى الفضاء. وعندما تكون الشمس البدائية قد وصلت إلى كتلتها الراهنة، لا يكون هناك المزيد من المادة التي تتساقط في القرص، فيبرد ويستقر على هيئة طبقة رقيقة حول النجم المركزي، وربما يصبح سلسلة من الحلقات التذكارية مثل حلقات زحل. لا يعتمد هذا التصور على النظرية ونماذج الكمبيوتر فقط، حيث تم رصد الكثير من النجوم الشابة بأقراص مادة الغبار التي تحيط بها، وصوّرها علماء الفلك بالتصوير الفوتوغرافي، مما يؤكد صحة الخطوط العريضة لهذا التصور. وهناك تصور حديث نسبياً، فمنذ تم تصوير أول قرص من هذه الأقراص، يحيط بنجم يطلق عليه اسم بيتا بكتوريس، لأول مرة بالتصوير الفوتوغرافي عام ١٩٨٤، وتم رصد أكثر من مائة من هذه الأقراص في منتصف التسعينيات. وفي الطراز البدئي لبيتا بكتوريس نفسه، يمتد القرص إلى مسافة ١٠٠٠ وحدة فلكية تقريباً، أي أبعد ألف مرة من نجمه المركزي مقارنة بالمسافة بين الأرض والشمس، ويحتوي على كتلة أكثر قليلاً من كتلة الشمس. وليس من المفهوم بشكل كامل في الوقت الحالي التفاصيل الدقيقة لتشكيل الكواكب بواسطة مادة الغبار في الجزء الخارجي الرقيق من القرص الذي يحيط بالشمس الشابة، ويحتاج الأمر إلى أكثر من مجرد تصور عام للصورة في مجملها. وأهم عامل لتحديد ما حدث للغبار والحبيبات الجليدية في القرص كان درجة الحرارة على أبعاد مختلفة من الشمس في المراحل المبكرة من تشكيل الكواكب، وهذا أمر من السهل معرفته. عند وحدة فلكية واحدة، وهي مسافة الأرض (الكوكب الذي يهمنا أكثر من غيره) عن الشمس، كانت درجة الحرارة نحو ١٠٠٠ كلفن، أو ربما أعلى قليلاً، وعند ٢,٥ وحدة فلكية من الشمس الشابة، كانت درجة الحرارة ٤٥٠ كلفن فقط، بينما انخفضت عند مسافة ٥ وحدات فلكية إلى نحو ٢٢٥ كلفن. ومن الواضح أن الحبيبات في المنطقة التي تكونت فيها الأرض قد سخنت بتلامسها مع الغاز في القرص الدوار إلى درجة لم تكتف بجعل كل المادة الجليدية المحيطة بالحبيبات تتبخر، لكنها دمرت أيضاً الجزيئات متعددة الذرات المهمة، بما في

ذلك الجزيئات العضوية (تلك التي تحتوي على الكربون). ولكن على بعد يتراوح بين ٢,٥ و٥ وحدات فلكية عن الشمس، كانت درجة الحرارة منخفضة إلى حد أن تظل الجزيئات العضوية سليمة، حتى مع تبخر المواد الجليدية. وحتى على مسافة أبعد من ذلك، نحو ٥ وحدات فلكية، كانت درجة الحرارة منخفضة إلى درجة أن الجليد، بما في ذلك الماء المتجمد، ظل محفوظاً كأحد مكونات مادة غبار القرص. حتى إن حبيبات المادة في القرص بدأت تلتصق ببعضها لتكوين كتل أكبر، وكانت المنتجات النهائية لعملية النمو المتعاظم هذه مختلفة عند المسافات المختلفة من الشمس.

وتعتمد المرحلة الأولى في هذه العملية بالفعل على مدى لزوجة حبيبات الغبار هذه بالغة الصغر. ولأن هذه الحبيبات تتحرك كلها في نفس الاتجاه حول الشمس، فإنها عندما تتصادم ببعضها يتم ذلك بشكل معتدل، حيث تباغت الحبيبة حبيبة أخرى وتدفعها من الخلف بوكزة خفيفة، فيصبح من الممكن لها أن تلتصق معاً، لتشكيل كرات رقيقة وخفيفة كالزغب من مادة كانت تحتوي منذ زمن طويل جداً على كتلة كافية لكي تبدأ في جذب كل حبيبة بواسطة الجاذبية. وعبر فترة تمتد نحو مائة ألف سنة، تنجح هذه العملية في تكوين أجرام بطول كيلو متر أو أكثر. وتواصل هذه الأجرام التي يُطلق عليها الكويكبات [٧٠] الانضمام إلى بعضها البعض، لتكوين أجرام أكبر فأكبر، بينما يتم طرد بقايا الغاز في القرص بوساطة حرارة الشمس الشابة. وعلى بعد نحو ٢,٥ وحدة فلكية من الشمس (منطقة تقع تقريباً خارج مدار المريخ المعروف في الوقت الراهن) منذ نحو مليون سنة بعد بداية انهيار الكتلة الخفيفة الأصلية من الغاز والغبار، لا بد أنه كانت هناك في هذه المنطقة أجرام يتراوح عددها بين ٢٠ و٣٠ جراماً، تتراوح أحجامها بين حجمي القمر والمريخ، إضافة إلى عدد لا يحصى من الكويكبات الأصغر. وكانت الأجرام الأكبر تكتسح الأصغر، وتتصادم مع بعضها البعض، حتى انتهى بها الأمر إلى الكواكب الأربعة التي نراها في وقتنا الراهن في هذا الجزء من المجموعة الشمسية – عطارد والزهرة والأرض والمريخ. لكن كل هذه الأجرام كانت مصنوعة من

(٧٠) الكويكب planetesimal : أحد الكويكبات وهي أجرام سماوية صغيرة يُظن أنها وُجدت في مرحلة مبكرة من نشوء النظام الشمسي. (المترجم)

حبيبات السليكون التى لم تتعرض فقط لإزالة الجليد (وإزالة الماء بالتأكيد) لكنها احترقت أيضاً وأصبحت خالية من الجزيئات العضوية. وأبعد من نحو ٥ وحدات فلكية عن الشمس كانت الأمور مختلفة عن ذلك. حدثت نفس عملية تراكم الغبار لإنتاج أجرام أكبر، لكن هنا كان متوافراً كمية أكثر باستمرار من الجليد. ولا يقتصر الأمر على ذلك، بل إن كمية كبيرة من المادة التى كانت على هيئة جليد حول الحبيبات فى داخل المجموعة الشمسية، لكنها تبخرت، تم إطلاقها بعيداً بواسطة الريح الشمسية، لتتجمد من جديد فى المناطق الخارجية من المجموعة الشمسية، لتصبح نوعاً من الثلج ما بين الكواكب التى أضيفت إلى كتلة الكواكب المتكونة فى هذه المنطقة. ولم يكن الأمر صدفة أن الكواكب العملاقة المشترى وزحل وأورانوس ونبتون تتكون فى أغلبها من غازات مثل الميثان والأمونيا (النشادر)، تقع على مسافات تتراوح بين ٥ و٢٠ وحدة فلكية من الشمس.

وهناك منطقة بين المريخ (الذى يدور حول الشمس على مسافة ١,٥ وحدة فلكية) والمشترى (على مسافة ٥,٢ وحدة فلكية) تشغلها أجرام صخرية أصغر – حزام الكويكبات. وتكوّنت الكويكبات عندما كانت درجة الحرارة لاتزال مرتفعة جدا بحيث لا يمكن للعناصر المتجمدة أن تبقى، لكنها كانت منخفضة إلى درجة تكفى لحفظ الجزيئات العضوية المهمة. ومازالت نفاية حزام الكويكبات تسقط أحيانا على الأرض على هيئة أجسام نيزكية، لذلك تمت دراسة مكوناتها وتحليلها بشكل تفصيلى إلى حد ما [٧١].

هناك أيضاً ما هو أكثر أهمية بالنسبة إلى قصتنا هذه، فبالقرب من مدار المشترى، وبعيداً عن المجموعة الشمسية، تشكلت أجرام مماثلة ليس من المواد الصخرية فقط ولكن من تشكيلة العناصر الجليدية والثلجية الموجودة، فأنتجت المذنبات. وبينما كان المشترى يتضخم إلى كتلته الراهنة (٣١٨ مرة مثل كتلة الأرض) أطلقت

(٧١) لا تلتصق نفاية حزام الكويكبات أبداً ببعضها البعض لتكوين كوكب بسبب تأثير جاذبية المشترى المسببة للاضطراب. ولمزيد من التفاصيل حول تكوّن المجموعة الشمسية ودور الكويكبات والمذنبات فى ذلك، انظر "النار والأرض".

تأثيرات جاذبيته فوضى شاملة بين هذه المذنبات، وقذفت بكثير منها بعيداً إلى أبعد أعماق المجموعة الشمسية (بل أحياناً خارج المجموعة الشمسية نفسها فى الفضاء السحيق)، واندفع بعضها الآخر إلى الداخل ليصل إلى الكواكب الداخلية. ومن النادر أن تجد تقديراً دقيقًا لأعدادها. ومازال العدد الأكبر منها موجوداً فى مداره بعد كوكب نبتون فى سحابة حول الشمس (تُعرف باسم سحابة أويك أورت)، ويقدر هذا العدد بعدة آلاف من المليارات – كلها طُردت بهذه الطريقة خلال المراحل المبكرة لتكوُّن المجموعة الشمسية. ويحتوى كل مذنب على كتلة صغيرة حتى إنها إذا أضيفت إلى بعضها البعض لن تتجاوز ٣ – ٥ كتل شمسية، لكن برامج المحاكاة بالكمبيوتر توضح أنه فى المراحل المبكرة من تكوُّن المجموعة الشمسية انحرف عدد كبير جداً من المذنبات بواسطة المشترى إلى مدارات تجاوزت بهم الكواكب الداخلية فى المجموعة وأصبحوا بالقرب من الشمس حتى إن كتلتهم الإجمالية وصلت إلى ثلاثة أضعاف كتلة مادتهم على الأقل، تتراوح بين ١٠ و١٥ كتلة أرضية. وهذه كمية كبيرة من الكتلة، تتوزع على عدد هائل من المذنبات، ولم تعبر المذنبات كلها بالفعل الكواكب الداخلية، وإلا لم يكن لنا أن نوجد حالياً.

حان الوقت لمزيد من شحذ ما توصلنا إليه. وعلينا أن نركز الآن على ما حدث للأرض نفسها بينما كانت المجموعة الشمسية فى طريقها للتكون. عندما بدأت الحبيبات (السليكات والحديد والكربون)، التى كان مقدراً لها أن تصبح كواكب، تلتصق ببعضها البعض، ويطلق على ذلك عملية التراكم [٧٢] وهى عملية لا تطلق كمية كبيرة من الطاقة، لأن الحبيبات، التى تصبح بعد ذلك كتلة ضخمة من المواد، كانت تسير ببطء خلال تصادمها بالكوكب البدئى، الذى نما حجمه بدون أن يسخن. وعندما أصبح ضخماً بدرجة كافية صارت جاذبيته قادرة على سحب الأجرام الأخرى إلى سطحه بسرعة اصطدام كافية (وبالتالى طاقة حركية كافية لأن تتحول إلى حرارة) لتسخين السطح، وظل الداخل صلبًا مدة بالغة الطول، حتى رغم أن سطح الكوكب كان قد بدأ

(٧٢) عملية التراكم أو التجمّع accretion process : زيادة كتلة جرم سماوى بتجمع الغازات بين النجمية المتساقطة بفعل الجاذبية. (المترجم)

في الانصهار. واستغرقت كل عملية التراكم بالنسبة للأرض عشرات ملايين السنوات _ ربما استمرت ٥٠ مليون سنة – ولم يحدث سوى في المراحل الأخيرة من التراكم أن اخترقت حرارة السطح الأرض ووصلت إلى القلب وصهرته بالكامل. ومع استمرار حالة سيولة الكوكب بكامله (الذى ارتفعت حرارته بسبب الطاقة الحركية الناتجة عن اصطدام الأجسام النيزكية بسطحه)، استقر الحديد الكثيف في قلب الكوكب، بينما طفت السليكات الأخف على السطح. وعندما تضاءلت عمليات القصف بالأجسام النيزكية البدائية وتوقفت تقريبًا، برد سطح الأرض وتصلد كطبقة صخور أغلبها من السليكات، مع غلاف عازل مازال يحيط بالقلب المنصهر. ويحتوى القلب الذى يغلب عليه الحديد على كميات أصغر – لكنها مهمة – من العناصر الثقيلة الأخرى : نفاية السوبرنوفا التى تحتوى على يورانيوم ذى نشاط إشعاعي. وكان لتكوين طبقة عازلة من الصخور الصلبة على السطح، تلك الطبقة التى تحتفظ بالحرارة مثل بطانية تحيط بالأرض، وعلى الطاقة التي يطلقها التحلل الإشعاعى لليورانيوم، ميزة المحافظة على باطن الأرض ساخنًا وعلى حالة الانصهار حتى وقتنا الراهن. وحيث إن الطاقة التى مايزال اليورانيوم يطلقها كانت قد وُضعت في نوى الذرات عندما ظهرت نتيجة انفجار السوبرنوفا (وبشكل رئيسى عن طريق طاقة الجاذبية التي أُطلقت فى انهيار النجم الذى انفجر)، فإن هذا يعنى أن باطن الأرض احتفظ بسخونته حتى الآن بتخزين طاقة السوبرنوفا من الناحية الأساسية – ويشبه الأمر إلى حد كبير عند إشعال كتلة فحم حيث يتم إطلاق طاقة من ضوء الشمس المختزن داخل المادة التى أصبحت فحمًا بواسطة التمثيل الضوئي في النباتات التى كانت موجودة منذ عشرات الملايين من السنوات فى الماضى.

وخلال نحو عشرة ملايين سنة من تصلد سطح الأرض، شهد الكوكب آخر خطوة فى التغيرات المفاجئة العنيفة خلال عملية تكوينه، عندما تلقى ضربة طائشة من جرم أكبر بقليل من كوكب المريخ (كتلة المريخ لا تتجاوز جزء من عشرة من كتلة الأرض). وأعاد هذا الحدث صهر الطبقة السطحية للأرض، وكل الحديد الذى أتى إلى الأرض بسبب هذه الصدمة انصهر وأضيف إلى باطنها، حيث إن الجرم المتصادم دُمر بكامله خلال الصدمة. لكن الصدمة قذفت بكمية كبيرة من مادة السليكات مرة أخرى إلى

الفضاء، وهو خليط من نفاية الجرم المتصادم والسليكات المنصهرة من الأرض نفسها، ربما يصل إلى عشرة أمثال كتلة القمر (القمر كتلة أكبر قليلاً من جزء من مائة من كتلة الأرض، مما يجعله أكبر بعض الشيء من جزء من عشرة من المريخ). وضاع أغلب هذه المادة فى الفضاء، لكن بعضها تكونت منه حلقة حول الأرض، مشابهة لحلقة المادة التى تكونت حول الشمس الشابة، ولكن على مقياس أصغر. وحدثت عملية تراكم من هذه المادة لتكوين القمر، بالطريقة نفسها تقريبًا التى تراكمت بها المادة حول الشمس لتكوين الكواكب. وهذا يوضح سبب أن للقمر هذا القلب الحديدى الصغير فقط، وسبب دوران الأرض بهذه السرعة حول محورها، مرة كل ٢٤ ساعة – إن ذلك نتيجة اللف الذى نتج عن التصادم.

ويوضح أيضًا اختلاف آخر محير بين الأرض والزهرة، الكوكب الذى يعتبر عادة توأم للأرض من ناحية الحجم، ومن المفترض أن الكوكبين تشكلا بالطريقة نفسها تقريبًا. والقشرة الصلبة من الصخور على سطح الأرض فى الوقت الراهن تعتبر رقيقة نسبيًا – فسمكها ٥ كيلومترات فقط تحت المحيطات (التى تغطى نحو ثلثى السطح) و٣٠ كيلومترًا في المتوسط بالنسبة للقارات. وبسبب أن هذه القشرة رقيقة فإنه من السهل نسبيا أن تتحطم، لتكوين صفائح، تشبه بالأحرى لغز الصور المقطعة، تتدافع بسبب تيارات الحمل فى المادة السائلة أسفلها. وبسبب ذلك الجرف القارى والتيار الدائم من الأنشطة البركانية والزلزالية، وخاصة فى المناطق التى تتصف بوجود شروخ بين الصفائح – ويطلق على الظاهرة كلها علم تكتونية [٧٢] الصفائح.

وعندما أرسلت مجسات الفضاء بيانات من كوكب الزهرة، أصابت الدهشة علماء الكواكب لاكتشافهم أن هذه البيانات لم تحتو على هذا النوع من النشاط السطحى. فلا توجد صفائح ولا تكتونية صفائح على الزهرة. وبدلا من ذلك، فإنه بحساب عدد فوهات البراكين على سطح الزهرة حاليًا ومقارنته بعدد فوهات البراكين على القمر

(٧٢) علم التكتونية tectonics : دراسة معالم الأرض البنائية أو عملية التشويه التى تغير شكل قشرة الأرض محدثة القارات والجبال.. إلخ . (المترجم)

وعطارد، يتبين أن سطح الزهرة بكامله قد تعرض لتغيُّر ضخم مفاجئ حدث منذ نحو ٦٠٠ مليون سنة مضت. وهناك نماذج تتنافس لتفسير ذلك، وما أميل إليه أكثر هو ذلك الذي يقول بأن كوكب الزهرة كان له قشرة سميكة جداً (ربما يصل سمكها إلى ٥٠ – ١٠٠ كيلومتر على سطح الكوكب بكامله) لذلك لم يكن هناك نشاط تكتوني في الصفائح، وأن الحرارة القادمة من الداخل لا تطلقها البراكين بشكل مستمر. وتكون النتيجة أن الحرارة الناتجة عن التحلل بالنشاط الإشعاعي في باطن الزهرة تراكمت عبر فترة زمنية طويلة حتى حدث تحطم في طبقة السطح بكامله وغطست في السائل أسفلها، الذي صعد من خلال الشروخ وبرد وتشكل منه سطح جديد.

وأنا أفضل هذا السيناريو لأنني مقتنع بوجود تفسير طبيعي لسبب اختلاف سطحي الزهرة والأرض إلى هذه الدرجة، تفسير يرتبط مباشرة بتكوُّن القمر خلال تصادم بين الأرض الشابة وجرم في حجم المريخ. ولم تعان الأرض من مصير الزهرة لأنها فقدت كمية كبيرة من مادة السليكات على سطحها خلال هذا الحادث الضخم، ولم يبق لها سوى قشرة رقيقة يمكن أن تتحطم بسهولة فتسمح للحرارة القادمة من داخلها بالإفلات بشكل دائم إلى الفضاء [٧٤].

ويستند هذا النموذج حول تكوُّن القمر إلى كثير من الأدلة، بما في ذلك الافتقار إلى قلب حديدي ضخم وحقيقة أن التاريخ الإشعاعي لصخور القمر يشير إلى أنها أقل عمراً إلى حد ما من الصخور الأطول عمراً على الأرض. وأتت أدلة ثانوية أيضاً من الأبحاث حول كوكب عطارد، حيث أدى تصادم كبير فيما يبدو إلى تأثير معاكس للضربة المنحرفة التي تلقتها الأرض.

بينما يشبه القمر قشرة الأرض بدون قلب، فإن عطارد يشبه قلب الأرض بدون قشرة. وتفسير ذلك أنه في مرحلة مبكرة من حياة عطارد تلقى ضربة أيضاً من شظية بحجم المريخ من نفايات الكواكب، لكنها كانت في الغالب صدمة وجهاً لوجه، وليست ضربة منحرفة. ولا بد أن هذه الصدمة كانت نتيجتها اندفاع القلب الحديدي للجرم

(٧٤) يجب أن أوضح هنا أن هذا من تخميناتي بالكامل، ولا يجب اعتباره حكمة ملهمة!

المتصادم إلى أعماق عطارد، لينصهر مع قلب الكوكب الأصلي. وقد يحدث في الوقت نفسه أن تنفجر الطبقات الخارجية المنصهرة (تصهرها الطاقة الحركية للصدمة) لكلا الجرمين وتُطرد بعيداً مبعثرة بالكامل في الفضاء، دون إعطائها الفرصة لتشكيل حلقة حول الكوكب ثم الاندماج بعد ذلك في القمر.

وتشير كل الأدلة إلى أن القمر كان موجوداً في مكانه منذ أقل من ٤,٥ مليارات سنة بقليل، وهو يدور حول الأرض، وأن الأرض كانت كرة صخرية حمراء ملتهبة، تبرد بالتدريج في الفضاء. ولم يكن لها غلاف جوي، وكانت كل آثار الماء، بشكل خاص، قد اختفت من المادة التي تشكل منها الكوكب، أولاً كجليد يحيط بحبيبات الغبار تبخر في حرارة القرص النشيط حول الشمس الشابة، ثم بعد ذلك بواسطة حرارة الصدمات التي تشكل الكوكب المناسب. وللأسباب نفسها، لم تكن هناك جزيئات مهمة في أي مكان على الكوكب. ويضاف إلى ذلك أيضاً أن الأدلة الجيولوجية تشير إلى أن الحياة ظهرت على الأرض منذ حوالي ٣,٨ مليارات سنة. وحيث إن هذه الأدلة على هيئة حفريات محفوظة في الصخور الرسوبية – الصخور التي ترسبت في قاع البحيرات والمحيطات المائية – وتشير أيضاً إلى أنه كان هناك الكثير من الماء حول الكوكب في ذلك الوقت. فما الذي حدث، في أقل من مليار سنة، لتحويل صحراء قاحلة لا هواء فيها إلى عالم مائي أصبح مأوى للحياة؟ خلال أول ٥٠٠ أو ٦٠٠ مليون سنة من وجود الأرض، تلقت عمليات قصف بقذائف من المذنبات المنطلقة من مناطق الكواكب العملاقة. ونعرف من قوانين الميكانيكا أنه تم إطلاق مادة جليدية من المناطق الخارجية للمجموعة الشمسية الشابة إلى الداخل تحت تأثير جاذبية الكواكب العملاقة نفسها، ويقول لنا المنطق إن جزءاً من آلاف مليارات المذنبات المندفعة إلى الداخل بهذه الطريقة لا بد أنها اصطدمت بالأرض والكواكب الداخلية الأخرى. وهناك أيضاً الدليل المستمد من النظر بالعينين، عندما ننظر إلى وجه القمر الذي تلقى عمليات قصف دائمة، فإننا ننظر مباشرة إلى الندوب الناتجة عن عمليات قصف منظومة الأرض – القمر استمرت نصف مليار سنة. ويشير النشاط الإشعاعي وتقنيات التاريخ الأخرى إلى أن عمليات القصف هذه انتهت منذ نحو ٤ مليارات سنة. ونرى أيضاً بمساعدة المسابر الفضائية، آثاراً مماثلة للقصف البدائي على سطحي عطارد والمريخ. ويعتبر كوكب الزهرة حالة

خاصة، كما أوضحت سابقًا، حيث هناك أدلة تشير إلى أن كل سطح الكوكب تغيرْ تمامًا عقب اضطراب مفاجئ منذ نحو ٦٠٠ مليون سنة. ولا تنتشر الفوهات البركانية فى الأرض نفسها كما هو الأمر بالنسبة للقمر، لأن المعالجات الجيولوجية تجدد باستمرار القشرة الأرضية مع انتشار مواد جديدة من التصدعات فى أرضية المحيطات، بينما تُدفن القشرة المحيطية القديمة باستمرار فى أعماق أخاديد القاع، وتغوص من جديد إلى أسفل لتنصهر على هيئة طبقات أسفل سطح الكوكب. ويعتبر هذا الانتشار للأرضية البحرية جزءًا من الأسلوب الكوكبى للنشاط التكتونى الذى لا يقتصر على تجديد أرضية المحيط عدة مرات خلال التاريخ الطويل للكوكب، لكنه يحافظ أيضًا على القارات متحركة فى الكوكب، تتصادم مع بعضها البعض فترتفع السلاسل الجبلية الشاهقة، وتسبب النشاط البركانى، وتساهم فى طمس أغلب الشواهد المباشرة على القصف البدائى.

رغم أن المذنبات توصف أحيانًا بأنها كرات جليد كونية، فإن ذلك لا يعنى أنها لا تطلق كمية كبيرة من الطاقة عندما تصطدم بكوكب ما. وطاقة الصدمة هى الطاقة الحركية للجرم، وتنطلق على هيئة حرارة. وتعتمد هذه الطاقة الحركية على الكتلة وسرعة الجرم المصطدم فقط. ومن خلال خبراتنا فى مرحلة الطفولة، فإن كل من شارك فى معارك كرات الجليد يعرف أن هذه الكرات ليست خفيفة دائمًا ولا هشة. ويمكن لكرة ثلجية لها نفس كتلة كرة البولنج، إذا ضُغطت بشدة (مثل رأس الإنسان الثلجى) وإطلاقها لكى تتدحرج إلى أسفل عبر مجاز البولنج بنفس سرعة كرة البولنج فإنها تبعثر القوارير الخشبية بنفس فعالية كرة البولنج العادية. وتم عرض طاقة صدمة مذنب سريع الحركة بشكل مثير للاهتمام فى يوليو ١٩٩٤، عندما كانت صور صدمات شظايا المذنب شوماخر - ليفى ٩ بكوكب المشترى على رأس قائمة الأخبار فى التلفزيون لعدة أيام. ويمكن لجرم فى حجم أحد هذه الشظايا (بقطر ١٠ كيلومترات)، إذا اصطدم بالأرض بسرعة ٥٠ كم/ثانية، أن يطلق طاقة مماثلة لانفجار ١٠٠ مليون ميجاطن من مادة تى إن تى - ويُعتقد بالفعل أن تكون مثل هذه الصدمة وراء "موت الديناصورات"، منذ نحو ٦٥ مليون عام.

عندما تصطدم مادة جليدية بالقمر، تصنع طاقة الصدمات فوهات ضخمة على سطحه، لكن للقمر جاذبية ضعيفة تجعل الغازات المتبخرة تفلت إلى الفضاء. وعلى أية حال فكل ما يحيط بالسطح يمكن أن يتبخر بسبب حرارة الشمس (إلا فى عدد من الحالات الخاصة، التى سأذكرها توا). عندما تضرب أجرام مثل هذه الكرة الأرضية، فرغم أن بعض المادة يتبخر خلال هذه الصدمات ويفلت أيضا، فإن كمية ضخمة تظل موجودة بسبب إمساك جاذبية الكوكب بها - ويتكثف بعضها ويتساقط على هيئة أمطار ليصبح محيطات، ويبقى بعضها على هيئة غازات، ليصير غلافًا جويا حول الأرض الشابة. من جانب آخر فبشكل عام توضح نماذج الكمبيوتر أن الماء البدائى الإضافى الذى جاء إلى الأرض بهذه الطريقة يعتبر عشرة أضعاف الكمية التى ظلت سائلة وأصبحت على هيئة محيطات، وأن ألف ضعف الغاز الموجود فى الغلاف الجوى حاليا ربما وصل على هيئة مذنبات. وأغلب هذه المادة الإضافية (المعروفة بشكل عام باسم المواد الطيارة) كانت مختلطة تماما بطبقات سطح الأرض (يوضحها بعض علماء الفلك بالصور التوضيحية كما لو كانت "الحرث بالصدمة")، لتشكيل نوع الصخور الغنية بالمواد الطيارة الموجودة فى وقتنا الراهن على سطح الأرض، وتتيح مصدراً لمادة (مثل ثانى أكسيد الكربون) التى بدأت تصبح من "الغازات المطرودة" من البراكين والتى يعاد تدويرها خلال سطح الأرض (فى هذه الحالة على هيئة صخور كربونات) ثم تعاد إلى البراكين من جديد خلال عمليات النشاط التكتونى. وفى إثبات مباشر لهذا النموذج عن أصل المواد الطيارة على الأرض، اكتشفت المسابر الفضائية فى النصف الثانى من التسعينيات وجود آثار ثلوج مذنبات، بما فى ذلك الماء، على قطبى القمر. ثلج المذنبات الذى تراكم فى الفوهات العميقة المظلمة حيث لا يصل ضوء الشمس أبداً.

قل حدوث القصف البدائى منذ نحو ٤ مليارات سنة (قلْ ولا نقول توقف، حيث تكشف الديناصورات أن الصدمات الآتية من الفضاء مازالت تحدث). وكانت الحياة موجودة على سطح الأرض خلال ٢٠٠ مليون سنة أخرى. ويقلل سيناريو صدمات المذنبات بالفعل من طول المدة المتاحة للحياة لكى تظهر، ويجعل ظهور الحياة حادثة مفاجئة إلى حد بعيد، لكن وجود مادة المذنبات فى الجزء الداخلى من المجموعة الشمسية يفسر أيضاً كيف تشبثت الحياة بسطح الأرض بهذه السرعة. كما أوضحت

فى الفصل الأول. وأصبح لدينا الآن من المعلومات ما يكفى لتقدير أهمية الأفكار التى قدمت أطرها العامة لك فى ذلك الفصل.

فنحن نعرف بالفعل أن مادة المذنبات غنية بالجزيئات متعددة الذرات، بما فى ذلك نوع الجزيئات العضوية التى تُعتبر لبنات الحياة – وحتى أشياء أخرى مثل الأحماض الأمينية، الوحدات الدنيا للبروتينات. وأول إعلان عن التعرف على حامض أمينى فى الفضاء تم فى ١٩٩٤، بواسطة فريق من جامعة إلينوى. حيث توصلوا إلى دليل بمنظار الطيف (على أطوال موجات الراديو) على وجود جلايسين، أبسط حامض أمينى، فى سحابة غاز وغبار ما بين النجوم بالقرب من مركز مجرتنا. وكشفت نفس سلسلة عمليات الرصد أيضًا ما وصفه الفريق بأنه "جزيئات ضخمة مرنة" أخرى، تتضمن السيانيد الإثيلى وفورمات [٧٥] الميثيل. ورغم عدم رصد أحماض أمينية أخرى فى الفضاء حتى الآن بواسطة بصماتها الطيفية، فإنه تم العثور عليها، ضمن جزيئات عضوية أخرى معقدة، داخل شظايا مادة الأحجار النيزكية. تلك المواد الصخرية القادمة من الفضاء التى تسقط على الأرض. ويعود بعض هذه الأحجار النيزكية إلى زمن تكوين المجموعة الشمسية، منذ ٤ مليارات سنة على الأقل. ورغم أنها سقطت حديثًا على الأرض، حيث كانت هائمة فى الفضاء خلال الأربعة مليارات سنة الماضية، فإنها حفظت عينات سليمة للمادة البدائية التى صُنعت منها الكواكب. واحتوت أيضًا، إضافة إلى الأحماض الأمينية (لبنات بناء البروتينات)، على جزيئات يُطلق عليها البيورينات والبيريميدينات [٧٦] ، التى تعتبر وحدات دنيا لجزىء الحياة ذاته، وهو الدنا. وهذا دليل مباشر على أن هذه الجزيئات موجودة فى سحابة ما بين النجوم التى تكونت منها المجموعة الشمسية، وكانت موجودة فى النفاية التى سقطت على الأرض بعد تكوُّنها –وإذا كانت هذه الجزيئات المركبة موجودة فى القطع الحجرية الصغيرة

(٧٥) الفورمات formate : ملح عادى أو ملح عضوى لحمض الفورميك . (المترجم)

(٧٦) البيورينات purines : أىٌ من المركبات العضوية المشتقة من البيورين أو مرتبطة تركيبيًا به تضم الحمض البولى وعناصر الحمض النووى. والبيريميدينات pyrimidines : أىٌ من المركبات الأساسية المتعددة المشتقة من أو المرتبطة بتركيبها بالبيريميدين وخاصة مكونات الحمض النووى . (المترجم)

فى النفاية الطافية حول المجموعة الشمسية فى الوقت الراهن، فإنها كانت موجودة بالتأكيد فى المذنبات الجليدية التى ضربت الأرض بمثل هذه الوفرة فى ذلك الوقت.

ومع ذلك من الصعب معرفة كيف استطاعت هذه المادة الجزيئية البقاء رغم حرارة التصادم التى أطلقت طاقة تصل إلى ١٠٠ مليون ميجاطن من مادة تى.إن.تى. وافترض بعض علماء البيولوجيا (وبعض علماء الفلك)، بسبب ذلك جزئيا، أن تكون الحياة قد بدأت فى أعماق الكوكب، أسفل طبقات السطح التى تم حرثها بواسطة صدمات المذنبات، حيث يمكن استخدام طاقة حرارة باطن الكوكب كقوة دافعة للتفاعلات الكيميائية حيث تظهر الجزيئات التى يمكنها أن تنسخ نفسها . وبشكل ما تعتبر هذه الفكرة جذابة لأنها تفترض أن الحياة يمكن أن تظهر داخل أى كوكب ملتهب. وذلك يتيح ٦٠٠ مليون سنة إضافية أو ما يقرب منها لتحويل المادة غير الحية إلى مادة حية. لكن لا حاجة بنا إلى هذه الفكرة الجذابة، حيث لا يحدث مطلقًا أن تكون كل مادة المذنبات الساقطة على سطح الأرض مصحوبة بأجرام ضخمة تتولد عنها كميات هائلة من حرارة الاصطدام – ومع نقل العمليات الكيميائية التى نتج عنها أسلاف الحياة على الأقل، إلى الفضاء، فإننا نكسب ليس مجرد ٦٠٠ مليون سنة، ولكن نحو ١٠ مليارات سنة لصالح هذه العمليات لكى تنجز مهمتها.

ويعتبر هذا الزمن فترة زمنية بالغة الطول، على اعتبار تعقد الجزيئات التى رُصدت بالفعل فى سحب ما بين النجوم (وحتى بعد أن نضع فى اعتبارنا حقيقة أن التفاعلات الكيميائية بطيئة إلى حد ما فى هذه السحب، بسبب كميات الطاقة المتواضعة نسبيا المتوافرة لدفع هذه التفاعلات). لذلك كانت هناك وجهة نظر يتبناها قلة من علماء البيولوجيا وعلماء الفلك مؤداها أن المنظومات الحية الأصلية قد تكون ظهرت أولاً فى الفضاء، ثم انتقلت إلى أسطح الكواكب فى وقت لاحق. ويفترض نوع من هذه السيناريوهات أنه ربما كان هناك أجرام تشبه المذنبات فى أعماق الفضاء، تتسم بالدفء داخلها بسبب التحلل الإشعاعى للعناصر الثقيلة الناتجة عن انفجارات السوبرنوفا – كانت ساخنة إلى الدرجة التى جعلت لها مراكز سائلة، حيث عبرت المراحل الأخيرة من التطورات الكيميائية الحدود الفاصلة بين غير الحى والحى. ومرة أخرى نقول إن هذه الفكرة لها سماتها الجذابة، ليس أقلها ما تتضمنه الفكرة من احتمال وجود آلاف المليارات من المواقع المرشحة لحدوث هذه الخطوات الكيميائية

المهمة فيها حتى فى سحابة المذنبات حول شمسنا، وما بالك بالأماكن الأخرى فى الكون. ولكن نقول مرة أخرى، مثل ما قلنا بالنسبة لفكرة الأصل الداخلى، أنه ليس من الضرورى الذهاب إلى هذا الحد للعثور على طريقة معقولة لظهور الحياة على الأرض وتشبثها بها (وربما فى عدة كواكب أخرى تشبه الأرض وتدور حول نجوم مثل الشمس).

دعنا نتمسك بما نعرف بأنه حدث بالتأكيد. كما أن مادة المذنبات التى أتت إلى الأرض خلال الاصطدامات الرئيسية، وارتفعت درجة حرارتها نتيجة الكرات النارية المصاحبة لهذه الاصطدامات إلى الحد الذى دمّر الجزيئات المعقدة، فإن مقداراً من المادة سقط على الأرض بشكل أكثر هدوءاً. وعندما تدخل المذنبات الجزء الداخلى من المجموعة الشمسية، تبخر حرارة الشمس المادة الموجودة على أسطحها الجليدية، التى تحمل الغبار معها، وتمتد هذه المادة خارجة من المذنب لتصنع هذا الذيل النحيل المتوهج (السبب الوحيد لتوهجه أنه يعكس ضوء الشمس، وليس لأنه ساخن) والذى يعتبر السمة الأكثر قابلية للرؤية بالنسبة للمذنب لمن يشاهده من الأرض، حتى لو كان المقدار الأكبر من الكتلة مازال فى رأسه الجليدى. وتمر بعض المذنبات مرات عدة حول الشمس، حتى تعوقها تماماً هذه الغازات الناتجة لتصبح مساراً من المادة الصلبة المنتشرة عبر المدار الأصلى للمذنب. وإذا حدث ومرت الأرض عبر أحد مسارات النفاية الكونية هذه، ينتج عن القطع الكبيرة من غبار المذنبات، بحجم حبيبات الرمل، طلقات متألقة (ذيول النيازك) عندما تحترق فى الغلاف الجوى للأرض. وهذا هو سبب أن سقوط الشهب يحدث فى أوقات محددة من العام، عندما تكون الأرض فى وضع عبور لمدارات المذنبات الميتة أو تلك التى فى طريقها للموت - فالأسديات مثلاً، عبارة عن شهب تُرى سنويا فى ١٧ نوفمبر (أو فى اليوم السابق له أو التالى له)، وهى قطع من نفايات تدور متتبعة مدار المذنب المعروف باسم تيمبل - تاتل. وتتحطم بعض المذنبات الأخرى بالكامل بواسطة قوى المد والجزر إذا مرت بالقرب من الشمس، أو أصبحت قريبة جدا من كوكب ضخم، وتمزق شوماخر - ليفى ٩ بهذه الطريقة بسبب شد جاذبية المشترى، قبل تحطم شظايا المذنب على المشترى فى مدارها الثانى. وبأى من الطريقتين، فإنه إضافة إلى قطع النفايات بحجم حبيبات الرمال التى تحترق فى

الغلاف الجوى للأرض على هيئة شهب، فهناك أيضا كمية من الغبار الأكثر دقة، الذى حدث له أن تجمد داخل المذنبات (وحدث له قبل ذلك أن كان جزء من سحابة الجزيئات العملاقة التى تكونت منها المجموعة الشمسية)، يستقر فى الغلاف الجوى بخفة أكثر من أى ريشة، وينجرف هابطاً بهدوء إلى سطح الكوكب.

وحتى فى عصرنا الراهن، تحمل جسيمات غبار ما بين الكواكب التى تسقط بهدوء، على الأرض بهذه الطريقة، نحو ٣٠٠ طن من المادة العضوية إلى سطح الكوكب سنويا. وهذه مجرد مادة عضوية - جزيئات متعددة الذرات تحتوى على الكربون - مختلطة حتى بنفايات ما بين الكواكب غير العضوية. وبالطبع ليس هناك أى توقع بأن يكون لهذه المادة العضوية أى دور مهم فى تكوين أنواع جديدة من الجزيئات الحية، فإنها إما يتم تدميرها بواسطة التفاعلات الكيميائية العادية (خاصة الأكسدة، حاليًا - لكن لم يكن هناك أكسوجين حر فى الغلاف الجوى للأرض حتى تم وضعه فيه بواسطة الكائنات الحية) أو تُمتص بواسطة سلاسل الحياة الموجودة على الأرض. لكن عندما كانت الأرض شابة، ولم يكن هناك لا أكسجين ولا هواء لتدمير هذه الجزيئات ولا كائنات حية هنا وهناك لتأكلها، كان يطوف فى الجزء الداخلى من المجموعة الشمسية كثير من المذنبات ولا بد أن كمية الغبار العضوى التى سقطت على الأرض كانت أعلى من ذلك بكثير. وهناك تقدير معقول مؤداه أنه مع نهاية القصف الذى استمر ٦٠٠ مليون عام للكواكب الداخلية بواسطة المذنبات، بعد أن ضربت معظم المذنبات، التى انطلقت إلى الجزء الداخلى من المجموعة الشمسية تحت تأثير جاذبية الكواكب العملاقة، فضربت الكواكب أو تحطمت إلى نفايات، سقط نحو ١٠٠٠٠ طن من المواد العضوية من السماوات (بالفعل مثل المن (٧٧) من السماء) سنوياً. وخلال ٣٠٠٠٠٠ سنة يمكن أن يصل ذلك إلى كتلة تساوى كتلة كل الكائنات الحية على الأرض فى عصرنا الراهن، وخلال عدة مئات الملايين من السنين منذ نهاية القصف الكونى حتى ظهور الحياة فى سجل الحفريات، يمكن للمادة العضوية التى سقطت على الأرض أن تكوّن (إذا تم نشرها بالتساوى) طبقة تحتوى على ٢٠ جرام من النفايات العضوية فى

(٧٧) المن manna : الذى أنزل على بنى إسرائيل. (المترجم)

كل سنتيمتر مربع على كل سطح الأرض. وليس هذا بالكثير - لكن ضع في اعتبارك أن وعاءً صغير مليئا بالسمن الصناعي النباتي (مرجرين) يحتوى على ٢٥٠ جرام من المادة العضوية. فإذا لم يحدث شيء بالنسبة للمادة بعد سقوطها على الأرض، قد يساوى عمق كمية النفايات العضوية التي تتراكم على الأرض عقب قصف المذنبات، تراكم المحتويات الكاملة لوعاء المرجرين الذي يحتوى على ٢٥٠ جرامًا على كل مربع صغير مساحته ٣,٥ في ٣,٥ سنتيمترات فوق سطح الأرض بكامله. وعلى كل سطح الأرض تعتبر كمية المرجرين هذه مروعة، وتحتوى نفايات المذنبات على جزيئات أكثر أهمية بكثير مما يحتوى عليه وعاء مرجرين متوسط. من هنا فإنه بدلا من مجرد التراكم على الأرض، حدثت أشياء مهمة لهذه الجزيئيات تحت تأثير الطاقة المتاحة من ضوء الشمس وصواعق البرق العديدة التي تنطلق خلال الغلاف الجوى للكوكب الشاب.

وحتى لو لم يصل بنا الأمر إلى حد قبول النوع الحديث من فكرة التولد الإحيائي (٧٨)، التي شرحتها في الفصل الأول، والتي تقول باحتمال أن نفاية المذنبات كانت تحتوى على بكتيريا حية أو شظايا دنا، فإن التفسير "المحافظ" لهذا الدليل هو أن تلك النفايات لا بد أنها كانت تحتوى على تشكيلة من الجزيئات متعددة الذرات التي رصدناها في الفضاء، بما في ذلك أشياء مثل الفورمالديهايد والهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، وحتى الأحماض الأمينية. وحيث إنه من المحتمل أننا لم نرصد كل ما هو موجود هناك في فضاء ما بين النجوم، لا بد أن النفاية تحتوى على مقومات كيميائية أخرى أيضًا. وكمنحة إضافية، أجرى فريق من الباحثين في ناسا تجارب على خليط مواد حملته المذنبات إلى الأرض، فوجدوا أنه في بعض الحالات يمكن لأحوال موجة الصدمة الناتجة عن مثل هذا الجرم المصطدم بالغلاف الجوى أن يشجع التفاعلات الكيميائية حيث ينتج خليط المواد هذه، بما في ذلك سيانيد الهيدروجين والأسيتيلين (وكلاهما يوجد في سحب الجزيئات العملاقة)، الوحدات الكيميائية المعروفة باسم

(٧٨) التولُّد الأحيائي panspermia : ويقال له أيضًا عمومية الجراثيم أو التخلق الذاتي. ويُطلق عليه أيضًا النشوء الأحيائي biogenesis : أي المبدأ القائل بأن الكائنات الحية تنشأ فقط من كائنات حية أخرى وليس من مادة غير حية. (المترجم)

المجموعات الأمينية. وكما يوضح اسمها، فإن المجموعات الأمينية هي مكوِّنات الأحماض الأمينية، وكما أشرت من قبل فإن الأحماض الأمينية هي وحدات بناء جزيئات الحياة المعروفة باسم البروتينات.

ولا أريد أن أدعى أن أحداً قد فهم حتى الآن كيف جمعت لبنات الحياة لأول مرة نفسها لتصبح جزيئات حية. وطالما كان الأمر يخص تطور الحياة على الأرض، فإن ذلك الأمر لا يزال مجهولاً إلى حد بعيد. وبمجرد ظهور أول خلايا حية - أساساً مثل بعض البكتيريا الحديثة - منذ ٣,٨ مليارات سنة، فإن ما حدث بعد ذلك واضح المعالم نسبيا ومفهوم إلى درجة معقولة. لكنني أرغب فقط أن أؤكد في النهاية على مدى الفهم الجيد لكل شيء على الجانب الآخر من المجهول الضخم، من الانفجار العظيم نفسه وخلال تطور النجوم إلى بيئة ما بين النجوم التي ظهرت فيها السحب التي أصبحت نجوما جديدة وكواكب. ولقد عبَّرت عن دهشتي من أن هذه الأفكار حول طبيعة بيئة ما بين النجوم وطريقة بذر أسلاف الحياة في الأرض بمجرد أن بردت، لم تلق الترحاب الواجب، حتى في صفحات كثير من الكتب العلمية، دعك من الكتب المبسطة للجمهور العام. وبعد سبع سنوات لاحقة، حتى مع توافر المزيد من الأدلة، كان استمرار تدني مستوى الترحيب بهذا الاختراق في فهمنا لموقعنا في الكون، مثير حتى لمزيد من الدهشة. ولمزيد من الوضوح سأقدم آخر مثال دقيق. فحامض الفورميك (٧٩) (وهو المادة التي تبخها بعض أنواع النمل كسلاح دفاعي، وهي مقوم اللسع لدى نبات القراص اللاسع ذي الوبر الشائك) والميثينامين هما نوعان من الجزيئات العضوية متعددة الذرات التي تم رصدها في سحب ما بين النجوم الكثيفة. وهما يتحدان معا لتكوين الحامض الأميني، جلايسين. وتم رصد الجلايسين نفسه في الفضاء أخيراً. وحتى لو لم يصل إلى سطح الأرض، ولو لم يصل كلا من حامض الفورميك والميثينامين إلى الكوكب الشاب بالكميات التي تشير إليها حسابات كمية نفايات المذنبات التي كانت موجودة في المجموعة الشمسية حديثة التكوين، فمن المستحيل ألا تكون جزيئات

(٧٩) حمض الفورميك formic acid: يُطلق عليه أيضًا حمض النمليك، لهذا السبب الموضح (المترجم)

هاتين المادتين قد اتحدتا لتكوين الجلايسين. ونحتاج هنا إلى التأكيد على أن الأحماض الأمينية هي مجرد خطوة واحدة على طريق الجزيئات الحية. ومن وجهة نظري، فإن من أهم الاكتشافات العلمية في القرن العشرين (إن لم يكن بالفعل أهم اكتشاف ضخم ظهر حتى الآن في المجالات كافة وليس العلم فقط) أن مجرة درب اللبانة، والتي تعتبر حسب أحدث معلوماتنا مثالاً نموذجيا للمجرات التي لا تحصى التي يمتلئ بها الكون، يحيط بها هي نفسها مواد خام الحياة، وأن هذه المواد الخام للحياة هي المنتج الحتمي لعمليات ميلاد النجوم وموت النجوم. ولقد أجبنا عن أهم سؤال في الأسئلة المطروحة، ألا وهو : من أين أتينا؟ لكن يندر أن تجد من ينتبه إلى هذه الإجابة من خارج الدائرة الضيقة للمتخصصين في الشئون العلمية.

ويعتبر جيم لوفيلوك، واضع فرضية جايا، من القلة التي تقدر تماماً ما يعنيه كل ذلك. إذ يقول: "يبدو أن مجرتنا كانت مخزناً ضخماً يحتوي على قطع الغبار اللازمة للحياة". ويمكن التأكيد على أن الانتقال من غير الحي إلى الحي يعتبر في أفضل الأحوال غير مفهوم بالدرجة الكافية، لكن لا غموض هناك في مصدر مقومات الحياة. ولقد بدأت هذا الكتاب بما يبدو استعارة لغوية، وهي فكرة أن الحياة على الأرض مصدرها غبار النجوم، الذي صُهر في داخل النجوم ذاتها. وأنهي الكتاب باكتشاف أن ذلك لم يكن استعارة بأي معنى .. إنه الحقيقة حرفيا. فالمادة الخام التي تجمعت منها أول جزيئات حية على الأرض تم إحضارها إلى سطح الأرض على هيئة حبيبات بالغة الصغر من مادة ما بين الكواكب، محفوظة في القلب المتجمد للمذنبات المتكونة من نفايات ما بين النجوم من سحب الجزيئات العملاقة التي تكونت منها المجموعة الشمسية. وتكونت الحبيبات نفسها - بالفعل وليس مجرد استعارة - من المادة المنطلقة من النجوم. وكان "المن القادم من السماء" الذي حمل أسلاف أشكال الحياة إلى سطح الأرض، بالفعل وليس استعارة، هو غبار النجوم، وهكذا أصبحنا موجودين.

ملحق

عبر الكون والأكوان

توضح القصة التي حكيتها في هذا الكتاب العلاقة بين الحياة والكون، من الانفجار العظيم إلى وصول جزيئات الحياة إلى سطح الأرض. وهي قصة كاملة ومتماسكة توضح أصولنا الكونية التي تعود إلى غبار النجوم، لكنها ليست بالضرورة القصة الكاملة للحياة والكون. وفي هذا الملحق أريد أن أقدم باختصار إحدى الأفكار الحديثة الأكثر إثارة للاهتمام والتي يمكن، إذا تأكدت صحتها، أن تتجاوز بكثير القصة التي حكيناها - بشرط أن ننتبه إلى أن "الإثارة" لا تعني بالضرورة أن الفكرة "صحيحة". وتدور هذه الفكرة حول احتمال أنه كان هناك على الأقل تشابه جزئي (وقد يكون ما هو أكثر بكثير من التشابه الجزئي) بين أصل وتطور الكون بكامله وأصل وتطور الكائنات الحية. وتمثل هذه الأفكار الموضوع الرئيسي لكتابي المبكر "في البداية"، لكن نشره كان في ١٩٩٢، وهناك جوانب من الحكاية تستحق التحديث مع دخولنا إلى قرن جديد.

وكانت بداية هذه الأفكار اكتشاف أن كثيراً من خواص القوانين الفيزيائية تبدو "متوافقة بدقة" إلى حد كبير لكي يكون الكون مأوى مناسباً للحياة التي نعرفها. ولنأخذ مثالاً لذلك العلاقة بين قوى الطبيعة الأربعة التي تؤثر على الجسيمات الأولية. ولثلاثة من هذه القوى، الكهرومغناطيسية والقوتين النوويتين، شدة مختلفة عن بعضها البعض، لكنها كلها أقوى بكثير من الجاذبية، وهي أضعف القوى الأربعة. ولكي نتصور الجاذبية، نقول إن القوة الكهربائية للتنافر بين بروتونين يكون أكبر بنحو $١٠^{٣٨}$ مرات من قوة الجاذبية بين بروتونين، لذلك ليس من المستغرب أن نطلق بالكامل على قوة

الجاذبية. ولأن الجاذبية على هذه الدرجة من الضعف فإن النجوم تكون بكل هذه الضخامة - ويحتاج الأمر إلى اشتراك جاذبية عدد ضخم من الجسيمات (نحو ١٠ ⁵⁷ في حالة الشمس، كلها بروتونات ونيوترونات) لدفع المادة إلى قلب النجم إلى الحد الذي يتم فيه التغلب على قوى التنافر الكهربائي حتى يبدأ الاندماج النووي. فلو كانت الجاذبية أكثر قوة عشر مرات فقط من قوتها الفعلية (وهي أشد بما لا يتجاوز ١٠ ⁻³⁷ مرة من القوة الكهرومغناطيسية) لتغيرت أشياء كثيرة ولكان الاندماج النووي أكثر سهولة، ولكان عمر نجم مثل الشمس ١٠ ملايين سنة فقط، وليس ١٠ مليارات سنة. ولن يكون الوقت بالطول الكافي لكي يتيح للتطور أن يحدث على الكواكب بالطريقة التي حدث بها على الأرض.

ومن المناسب تأمل ما قد يكون عليه الكون إذا حدثت مثل هذه التغيرات لقوانين الفيزياء، لأنه ليس لدينا فكرة عن سبب أن قوى الطبيعة وثوابتها لها هذه الصفات بالذات. وهناك الكثير من مثل هذه "التوافقات". وتلك التي أعتبرها أكثر إثارة للاهتمام سبق أن قدمتها - وهي وجود رنين كربون يسمح لعملية ألفا الثلاثية بأن تحدث داخل النجوم، والتوافق المناظر في أن رنين أكسجين مماثل يكون عند المستوى غير الصحيح بالضبط لكي يتحول الكربون فوراً إلى أكسجين. ويكون مستوى الطاقة الملائم في الكربون هو بالضبط الحد الذي يمكن لعملية ألفا الثلاثية أن تحدث، ورنين الأكسجين المكافئ يكون أعلى بما يكفي لأن يتحد كل الكربون والهليوم في اندفاع سريع.

وكما سبق أن قلت هناك توافقات كثيرة من هذا النوع، ولن أقدمها كلها هنا [٨٠]. ويرى البعض أن هناك عشرين مثالاً "للتوافق الدقيق" لقوانين الفيزياء، جعلت أشكال الحياة مثل تلك التي نحن عليها ممكنة. وكل هذه التوافقات العشرين (أو أيا كان عددها) أمر لازم لكي نوجد. وفي كل هذه الحالات ليس لدينا سبب مسبق لأن تكون قوانين الفيزياء على ما هي عليه. وأحد طرق النظر إلى هذا الأمر أن نقول إن هذه الحالات غير متطابقة البتة، لكنه نوع من التكرار. لقد تطورنا في كون له قوانين فيزياء محددة؛ لذلك لن يكون من الدهش أن يغتنم تطورنا فرصة هذه الأحوال أكثر من

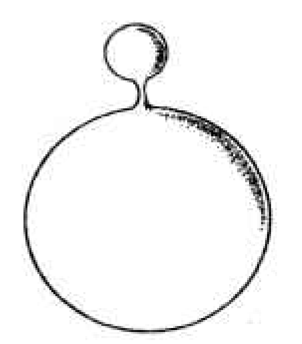
(٨٠) لكن انظر "مادة الكون" لجون جريبين ومارتن ريس (بنجوين ١٩٩٠)

اكتشاف أن الدببة القطبية تطور لديها فراء سميك للمحافظة على حرارة أجسامها، بينما تأقلمت القردة على حياة فوق الأشجار. نحن ما نحن عليه، إنه حوار مغلق؛ لأن الكون هو ما هو عليه. لكن هناك مدرسة في التفكير تعتقد أن الكون كان من الممكن ألا يكون على ما هو عليه - وكان من الممكن ظهور قوانين فيزياء أخرى من الانفجار العظيم. ويشبه ذلك التساؤل حول ما كانت تؤول إليه الحياة لو لم يكن هناك جليد في القطبين، ولم تكن هناك أشجار طويلة عند خطوط العرض القريبة من خط الاستواء، هل يظل لدينا دببة قطبية أو قردة؟ وهذا هو الذي سمح بوجود فكرة التطور الكوني.

وأهم تعبير هنا هو "التطور". والطريقة الجديدة، والتي لازالت حدسية باعتراف الجميع، تعتمد على تفسير التوافقات الكونية بتقديم ما يطابق تطور الحياة على الأرض. وتعود إلى لي سمولين، الفيزيائي من نيويورك، وأندري ليند، عالم الفلك من كاليفورنيا، وعدد من الباحثين الآخرين. وتقول فرضيتهم بأنه يمكن التوصل إلى فهم أفضل لطبيعة نشاط الكون ليس فقط بالاستفادة من سهولة تطبيق قوانين الفيزياء التي وضعها إسحاق نيوتن وألبرت أينشتاين، ولكن أيضا بوضع قواعد التطور التي توصل إليها تشارلز داروين وألفريد راسل والاس في الحسبان - نظرية الانتخاب الطبيعي. فالكون نفسه قد يكون حياً بالفعل، في هذا التصور، والأهم من ذلك قد يكون تطور بالانتخاب الطبيعي من حالة أبسط ينتج عنها التعقد الذي نراه حولنا.

إذا أخذنا النظرية النسبية العامة بمعناها الظاهري (ولم يصل أي شخص أبداً إلى تجربة أو ملاحظة تشير إلى ضرورة أن نفعل ذلك)، فإن الانفجار العظيم نفسه يكون قد ظهر من نقطة ذات كثافة لانهائية، وهي المفردة. وهناك مكان آخر تشير الحسابات إلى أنه تحدث فيه مفردات، باستخدام نفس النظرية النسبية - في قلب الثقب الأسود. وأثبت روجر بنروز وستيفن هاوكنج، في الستينيات، إن الكون المتمدد يمكن التعبير عنه بنفس المعادلات بالضبط على أنه ثقب أسود ينهار، ولكن في الاتجاه العكسي للزمن. وإذا كان كل تعقد المجرات والنجوم والكواكب والحياة العضوية قد خرج من المفردة التي وُلد منها كوننا، داخل ثقب أسود، ألا يمكن أن يكون شيئاً مماثلاً قد حدث في المفردات داخل مراكز الثقوب السوداء الأخرى؟

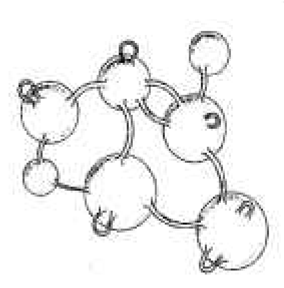
والتخمين البسيط لما قد يكون حدث لشيء ينهار إلى مفردة لكي يتحول إلى نوع من التمدد من المفردة التي نراها في كوننا، أن يكون هناك "ارتداد" في المفردة، يحوّل الانهيار إلى تمدد. ولسوء الحظ، فإن ذلك لا يحدث. فلا يمكن لمفردة تكونت من انهيار في المكان ذو الثلاثة أبعاد الذي نعيش فيه وبعد الزمن أن تحوّل نفسها وتنفجر من جديد إلى الخارج في نفس الأبعاد الثلاثة للمكان والزمان ذو البعد الواحد. لكن حدث في الثمانينيات أن تحقق علماء النسبية من أنه لا شيء يمنع مادة تسقط في مفردة في كوننا ذو الأبعاد الثلاثة للمكان والبعد الواحد للزمان، من التحول خلال نوع من الانحناء في الزمكان وأن تظهر كمفردة متمددة في مجموعة أبعاد أخرى، زمكان آخر. ومن الناحية الرياضية، فإن هذا الزمكان "الجديد" يتم تمثيله بمجموعة أربعة أبعاد (ثلاثة للمكان وواحد للزمان)، مثل كوننا تماماً، ولكن الأبعاد الجديدة كلها تكون على زاوية قائمة مع أبعادنا المعتادة الموجودة في الزمكان الخاص بنا.



شكل ملحق ١: "كون وليد" يمكن تصوره على أنه قبضة من فقاعة الزمكان الذي يمثله كوننا، ويتصل الكونان بواسطة "ثقب دودي".

ولكل مفردة، حسب هذا التصور، مجموعة الأبعاد الخاصة بها، وبهذا يتشكل كون من الفقاقيع في إطار نوع أكبر من الزمكان. وأحد طرق تصور هذا الأمر استخدام

تشابه سبق تقديمه بين الأبعاد الثلاثة للمكان المتمدد حولنا والسطح المتمدد ذو البعدين للبالونة التي يتم ملأها بالهواء، باستمرار. وليس التشابه مع حجم الهواء، داخل البالونة لكن مع السطح الخارجي المتمدد للبالون، الذي يستطيل بشكل منتظم في البعدين، وينحني حول نفسه على السطح المغلق. تصور ثقب أسود يتكون من نقطة بالغة الصغر على سطح بالون، قطعة صغيرة من المطاط المتمدد الذي ينتفخ خارجاً من السطح. هكذا تتكون فقاعة جديدة متصلة بالبالون الأصلي من خلال عنق ضيق - ثقب أسود. ويمكن لهذه الفقاعة الجديدة أن تتمدد سعيدة من جانبها لتصبح كبيرة مثل البالون الأصلي، أو حتى أكبر منه، بدون أن يتأثر السطح الخارجي للبالون الأصلي (الكون الأصلي) بالمرة. ويمكن أن ينمو من سطح الكون الأصلي (الزمكان) الكثير من الفقاقيع بهذه الطريقة في نفس الوقت. ويمكن بالطبع أن تنمو فقاقيع جديدة من سطح كل كون جديد، إلى ما لا نهاية. وأهم ما يتضمنه هذا الأمر إن كثيراً - إن لم يكن كل - من الثقوب السوداء التي تتكوّن في كوننا نفسه قد تكون بذوراً لأكوان جديدة. وبالطبع ربما يكون كوننا قد وُلد بهذه الطريقة من خلال ثقب أسود في كون آخر. وهذا التصور يغير بلا شك رأينا حول الكون، لأنه يعني أن الكون ليس وحيداً من نوعه، بل هو أحد الأكوان العديدة، تتصل فيما بينها بما يطلق عليه علماء الطبيعة الثقوب الدودية، كلها تتنافس الحصول على موقع لتنمو في الأزمان متعدد الأبعاد.



شكل ملحق ٢: إذا كان من المحتمل تكوّن كون وليد من ثقب أسود؛ فإنه من الممكن أن ينشأ عدد هائل من الأكوان (ما لا نهاية له من الأكوان، من حيث المبدأ) ترتبط بواسطة شبكة معقدة من الثقوب الدودية. وهذه هي القاعدة التي تنطلق منها الاستنتاجات القائلة بأن الأكوان نفسها ربما حدثت لها عملية تطور بمفهوم داروين للتطور.

وتتمثل فكرة سمولين فى أنه مع كل مرة ينهار خلالها ثقب أسود إلى مفردة ويتكون كون وليد جديد، تتغير قوانين الفيزياء نفسها بعض الشىء مع ظهور الكون الجديد من الثقب الدودى، بنفس طريقة تكوّن التنوع الوراثى بين أشكال الحياة العضوية على الأرض الذى يجعل النسل مختلف بعض الشىء عن الوالدين، والذى يتيح مادة خام للتطور بالانتخاب الطبيعى. وإذا حدث أن سمحت التغيرات العشوائية فى تطبيقات القوانين الفيزيائية - الطفرات - ببعض التمدد القليل، سوف ينمو الكون الوليد ويصبح أكثر ضخامة. وكلما تضخم الكون، ارتفعت احتمالات أن ينتج عنه ثقوب سوداء جديدة، حتى تصبح مفردات، ثم ينتج عنها أكوان جديدة. وسوف تكون هذه الأكوان الجديدة أيضاً مختلفة بعض الشىء من الكون الذى أنتجها. وقد يفقد بعضها القدرة على مزيد من النمو، فيتلاشى بدون أن يكون له نسل. لكن البعض الآخر قد ينمو ليكون أكثر ضخامة من الكون الأصلى، فينتج عنه ثقوب سوداء أكثر عدداً ، وكذلك المزيد من الأكوان الوليدة بالتالى. وسيكون عدد الأكوان الجديدة الناتجة فى كل جيل متناسب تقريباً مع حجم الكون التى نشأت عنه ، بل هناك أيضاً عنصر صراع ؛ حيث إن الكثير من الأكوان الوليدة تتنافس بطريقة أو بأخرى، وتتناحر للحصول على موقع فى الزمكان.

الوراثة سمة أساسية للحياة، وهذا الوصف لتطور الأكوان صحيح طالما نتعامل مع منظومات حية (وقد يقول سمولين إن السبب أننا نتعامل بالفعل مع منظومات حية). وفى هذا التصور تنقل الأكوان خواصها إلى نسلها مع بعض التغييرات الصغيرة، تماماً كما ينقل الناس صفاتهم إلى أطفالهم مع بعض التعديلات البسيطة.

والأكوان "الناجحة" هى تلك التى تترك الكثير من النسل. ومع الوضع فى الاعتبار أن الاختلافات العشوائية قليلة فى الحقيقة، ستكون هناك عملية تطورية أصيلة تفضل الأكوان الأكبر فالأكبر. وسيكون هناك فى الأجيال المتتالية تطور طبيعى يفضل تغيراً فى قوانين الفيزياء لتحسين إنتاج أنواع من النجوم التى تنتهى إلى تكوين ثقوب سوداء. ولن يكون المنتج النهائى لهذه العملية كون واحد ، ولكن الكثير من الأكوان التى يمكنها أن تصبح أكبر بقدر الإمكان مع استمرارها فى الثقب الأسود؛ حيث تشجع قوانين الطبيعة تكوين نجوم وثقوب سوداء، وكوننا ينسجم إلى درجة كبيرة مع هذا التصور.

وسمولين مغرم بشكل خاص بالإشارة إلى أن وجود الكربون والأكسجين فى الكون، الذى يعتمد على التوافق الدقيق بين هذين الرنينين النوويين، يعتبر عاملاً مهما فى عملية تكون النجم وتكون الثقوب السوداء، وليس فقط فى تطور الحياة. ولا تتكون النجوم الجديدة من سحب الغاز والغبار فى الفضاء إلا لأن تلك السحب قادرة على أن تبرد وتطلق حرارة مع تقلصها. وأحد الأسباب الرئيسية لقدرتها على أن تبرد هو أنها تحتوى على أول أكسيد الكربون، الذى يطلق الطاقة فى الجزء ما تحت الأحمر من الطيف. وبالنسبة للقائلين بأن حياة مثل حياتنا وُجدت لأن الكون هو ما هو عليه، يدعم هذا النوع من التصورات وجهة نظرهم - فلا حياة تستخدم الكربون والأكسجين لأنهما موجودان. لكنهما موجودين ؛ لأن الكون تطور بحيث يجيد إنتاج النجوم والثقوب السوداء .

ويمكن تطبيق هذا التصور على كل التوافقات المحيرة فى قوانين الطبيعة لتفسير لغز سبب أن الكون الذى نعيش فيه لا بد أن يكون على ما هو عليه. ولا يمكنك توقع تجميع عشوائى لمواد كيميائية حتى يمكنها أن تنتظم نفسها فجأة على هيئة إنسان، ولقد دفع هذا الأمر بعض الناس فى الماضى إلى البحث عن تفسير خارق للطبيعة لوجودنا. لكن فكرة التطور بالانتخاب الطبيعى ألغت الحاجة إلى التفسيرات الخارقة للطبيعة. وبنفس الطريقة لا يجب أن تتوقع أن تجمعاً عشوائياً لقوانين طبيعية ظهر من المفردة لكى يؤدى إلى الكون الذى نعيش فيه. ولقد قاد هذا الإدراك بعض الناس إلى القول بأن الانفجار العظيم نفسه ناتج عن تدخل خارق للطبيعة. لكن التطور بالانتخاب الطبيعى يمكنه أيضاً أن يلغى الحاجة إلى الاستعانة بما هو خارق للطبيعة فيما يتعلق بالكون فى مجمله. وتبعاً لسمولين وليند، فإننا نعيش فى كون يعتبر أكثر الأكوان احتمالاً للتكوّن.

وليس هناك افتراض بأن الكون تطور بهذه الطريقة الخاصة لأنها تناسب أشكال حياة مثل حياتنا، بل تطور بالأحرى لإنتاج ثقوب سوداء، وانتهزت الحياة فرصة وجود الشروط التى تفضل إنتاج ثقوب سوداء. وبطريقة ما يمكن القول إن أشكال الحياة مثل حياتنا تعتبر طفيلية تتغذى على العمليات التى تنتج الثقوب السوداء. وليست هذه الفكرة جديدة تماماً أو صادمة، ففى التحليل النهائى تعتمد الحياة على الأرض على

إمدادات الطاقة من الشمس، تلك الطاقة التى تأتى بشكل أساسى من تفاعلات الاندماج النووى الذى يحدث فى قلب الشمس. ولا تحدث هذه العمليات النووية لمنفعتنا الخاصة، وبنفس المعنى فنحن طفيليات تتغذى على سريان الطاقة الناتجة عن هذه التفاعلات.

وعلى أية حال، كل ذلك يعتمد على الزعم بأن كوننا تشكل (أو تطور) بطريقة تجعله ذو كفاءة فى إنتاج ثقوب سوداء جديدة، ومن ثم أكوان جديدة، كما هو متوقع. والجدل حول هذه النقطة له جانب تقنى تماماً لن أقدمه هنا. لكن الانتقادات ضد مدخل سمولين تقول إنه من الممكن حدوث توافق دقيق فى قوانين الطبيعة تجعل الكون أكثر فعالية فى إنتاج الثقوب السوداء (ومن ثم الأكوان البديلة). ويرون أنه لو كان سمولين على حق لكان التطور قد أنجز هذا العمل بالفعل. وبما أن الكون ليس مثالياً فى إنتاج الثقوب السوداء، فإن سمولين لا يمكن أن يكون على صواب. ولدىّ شكوكى حول هذا الرأى – ففى التحليل النهائى، كان التوافق التطورى الدقيق يجرى بلا شك هنا على الأرض، لكن هذا لم يصنع أى أنواع مثالية إلى الآن، حتى نحن. وردّ سمولين على كل هذه الآراء، كلما تعلق الأمر بأفكاره، وقد نجح فى دحضها جميعاً. ونتيجة لذلك اكتسبت أفكاره خلال السنوات القليلة الماضية قوة حيث تم سد كل الثغرات. وحتى لو وجد أحد ثغرة لا يمكن سدها، فسيكون هناك تفسير آخر محتمل حول سبب أن الكون على ما هو عليه.

ولقد قدّم إدوارد هاريسون، من جامعة مساتشوستس، فكرة تم تقديمها أيضاً بطريقة أقل تدبراً بواسطة علماء أكوان آخرين (خاصة آلان جوث من معهد مساتشوستس للتقنية). وقال إنه من المحتمل تماماً أن كوننا تم خلقه بالفعل – ليس عن طريق إله، ولكن بواسطة كائنات ذكية لديها تقنيات أكثر تقدماً بقليل مما لدينا. ضع فى اعتبارك أن سيناريو الكون الوليد يلد كل ثقب أسود خلاله كون جديد. ولكى يُصنع الكون لا يحتاج الأمر إلا إلى عمل ثقب أسود. وليس لدينا التقنية اللازمة لإنجاز هذا العمل، لكن لدينا المعرفة العلمية لفهم كيف تم إنجاز هذا العمل باعتصار كتلة من المادة إلى كثافات بالغة الارتفاع. ورغم أننا لا نعرف طريقة للاتصال بين الأكوان، لا يمكن القول بأن الكائنات القادرة بالفعل على صناعة هذه الأكوان لم تضع طريقة لمراقبة ما

يحدث داخل ما خلقته. ربما صنعت أكوان لها مجموعات مختلفة من القوانين الفيزيائية لا لشىء، سوى أن هذا أمر ممكن، وأنهم يرغبون فى دراسة هذه الأكوان، ومن المحتمل حتى أن خلق الأكوان يمدهم بمصدر يحتاجونه، لغرض ما لا نفهمه نحن، أو حتى لغرض مفهوم – فأحد الاحتمالات الواضحة أن حضارة فائقة قد تكون قادرة على استخراج طاقة من الثقوب السوداء. أو يكون ذلك قد حدث ولو بالصدفة، بالطريقة التى شرحها جورجى بينفورد فى روايته العظيمة "الكون". لكن ذلك فى الواقع تجوال فى عالم الخيال العلمى، ويحق لنا الآن أن نتوقف قليلاً. وهناك جانب مريح فى موقف هاريسون من الموضوع، لن يعترض على أن يطلق عليه طفيلى. وفى المستقبل القريب جداً، على المقياس الزمنى الكونى، قد يستطيع جنسنا صناعة الثقوب السوداء، ومن ثم الأكوان الوليدة، بنفس فرضية هاريسون عن الحضارات الفائقة. وفى هذه الحالة، سنساعد كوننا لإعادة إنتاج نفسه، وسيعنى ذلك رفع وضعنا من مجرد طفيليات إلى كائن حى محترم – شريك (إن لم يكن شريك بالتساوى) فى زيجة موائمة.

لا يجب المبالغة فى أخذ هذا الملحق مأخذاً جاداً، لكن بقية الكتاب تعتبر جادة تماماً. وأيا كان السبب أو الأسباب التى جعلت قوانين الفيزياء على ما هى عليه، لا شك أن الكون تأسس بطريقة تجعل إنتاج الكربون والأكسجين والنتروجين بهذه الوفرة (بالمقاييس البشرية) نتيجة لا مفر منها لدورات حياة النجوم، وأنه من المحتم أن تتشكل كواكب مثل الأرض حول نجوم مثل الشمس تتناثر فيها جزيئات عضوية معقدة، يعود أصلها إلى سحب ما بين النجوم، عندما تصل المذنبات إلى هذه الكواكب. ونحن مصنوعون من غبار النجوم؛ لأننا نتيجة طبيعية لوجود النجوم، ومن هذا المنظور من المستحيل التصديق بأننا وحدنا فى الكون.

تعليقات الصور الملونة

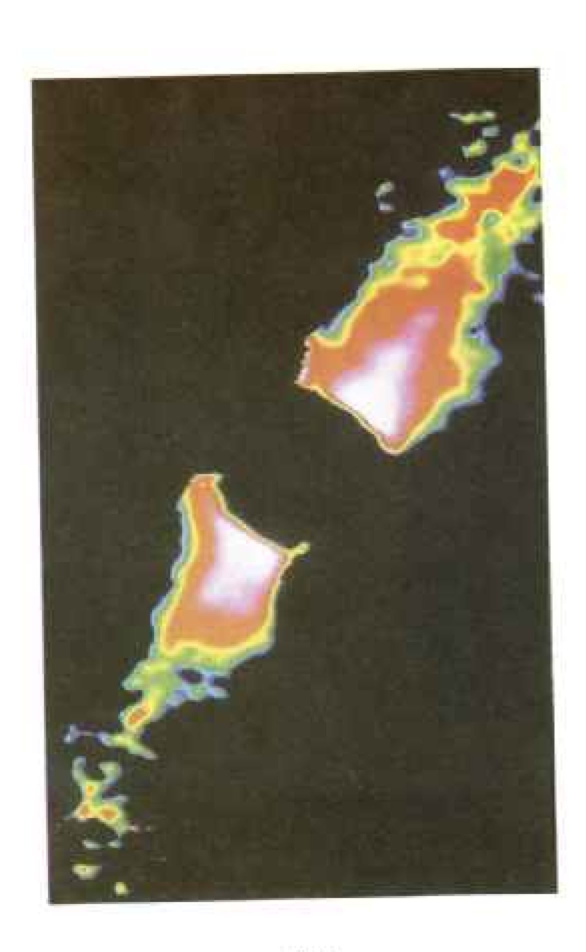
١ - هال - بوب

المذنب هال - بوب (يستمد اسمه من العالمين اللذين اكتشفاه) يعتبر مثالاً نموذجيًا للمادة المتخلفة عن ميلاد المجموعة الشمسية. والتقطت هذه الصورة فى ١٩٩٧، حيث يظهر للمذنب ذيلان ذيل أبيض ناتج عن انعكاس ضوء الشمس على الغبار وذيل أزرق من توهج الغاز المتأين.



٢ - ميلاد مجموعة كوكبية

بيتا بيكتوريس، نجم جديد يبعد نحو ٥٠ سنة ضوئية، يوضح ما كانت عليها مجموعتنا الشمسية عندما كانت الكواكب في دور التكوين. والنجم محاط بقرص رقيق من الغبار الذي يلمع بانعكاس الضوء الآتي من النجم المركزي. وتم حجز الضوء الآتي مباشرة من النجم نفسه في هذه الصورة.



٣ - أنشوطة الدجاجة (٨١)

نجوم السوبرنوفا هي مفتاح سر وجودنا. وهذا النموذج من بقايا سوبرنوفا عمره ٢٠٠٠٠ سنة انفجر على بعد ٢٥٠٠ سنة ضوئية في كوكبة الدجاجة. وأنشوطة الدجاجة عبارة عن حائط من الغاز، يمتد من السوبرنوفا، التي تلتقي بسحابة ثابتة من الغاز. وتوهج الأنشوطة كان نتيجة الصدمة.



(٨١) الدجاجة Cygnus : إحدى الكوكبات الشهيرة في نصف الكرة الشمالي وترى في ليالي الصيف والخريف. ويمكن تصور ألمع النجوم في الكوكبة متصلة بصليب مربوط بخيط طويل (المترجم).

٤ - بقايا سوبر نوفا IC 443

بقايا سوبرنوفا أنشوطة الدجاجة، وهو البقايا الصغيرة لغلاف غازى متمدد من نجم انفجر منذ ٢٠٠٠٠ سنة. ويقع على بعد نحو ٢٥٠٠ سنة ضوئية من الأرض.



٥ - حشد كروى

حشد كروى [٨٢] **M80**، مثال واضح لعدة مئات من الحشود التي تحيط بمجرتنا. ولأن كل النجوم في الحشد لها نفس العمر، وليس لها نفس الكتلة، فإن دراسة الحشود الكروية تتيح أفكاراً مهمة حول تطور النجوم.



(٨٢) حشد نجومي كروي globular star cluster : الحشد الكروي هو تجمع من عدد كبير من النجوم بتركيز كبير ناحية مركز الحشد (على خلاف الحشد المفتوح). وكثافة النجوم في المركز عموماً عالية جداً لدرجة أن رؤية هذه النجوم متفرقة يبدو مستحيلاً بالوسائل المتاحة حالياً (المترجم).

٦ - السدين الحلقى (٨٣)

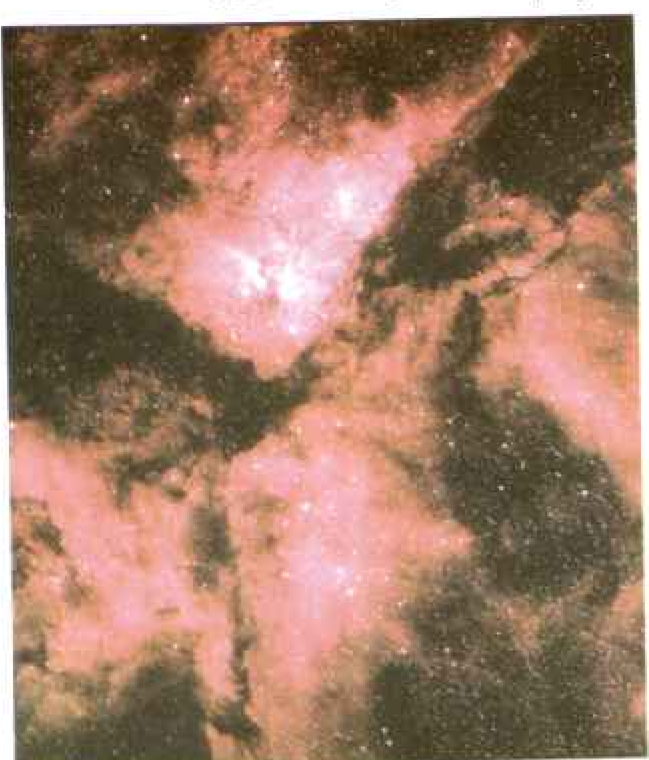
أحد أكثر الأجرام السماوية إثارة للاهتمام فى الليل، وهو السديم الحلقى الذى يعتبر سحابة من الغاز انطلقت من نجم فى مرحلة متأخرة من عمره - سديم كوكبى. ويبلغ قطره نحو سنة ضوئية، ويبعد نحو ٢٠٠٠ سنة فى كوكبة السلياق.



(٨٣) السديم الحلقى Ring Nebula : هو سديم كوكبى بين النجمين بيتا وجاما فى كوكبة السلياق، وهى إحدى كوكبات نصف السماء الشمالى وترى فى ليالى الصيف، ويظهر السديم كحلقة لامعة بيضاوية بعض الشىء، وقد أمكن فوتوغرافيًا التحقق من تمدد هذا السديم (المترجم).

٧ – سديم القرنية إيتا (٨٤)

يحتوى هذا السديم فى كوكبة القرنية الكثير من أكثر النجوم ضخامة التى يعرفها علماء الفلك، ويضىء سحابة من الغاز تبعد ٧٠٠٠ سنة. وكان القرنية إيتا أحد هذه النجوم الأكثر لمعانًا فى السماء فى ثلاثينيات القرن التاسع عشر، ثم خفت ضوءه، لكنه توهج مرة أخرى منذ ١٩٩٧ . وهو من أكثر المواقع قابلية لظهور السوبرنوفا – لكن ليس من المتوقع أن يحدث ذلك خلال المائة سنة القادمة.



(٨٤) سديم القرنية إيتا Eta Carinae nebula : القرنية هى إحدى كوكبات نصف الكرة الجنوبى، ويمر الطريق اللبنى بأجزاء من الكوكبة. والنجم الرئيسى ألفا يسمى سُهيل، وهو ثانى نجم فى اللمعان. ومعظم أجزاء الكوكبة يُرى مائلاً على الأفق (المترجم) .

٨ - نجم سوبر نوفا بعيد

التقط علماء فلك هذه الصورة فى ١٩٩٤ لنجم متفرد فى مجرة NGC 4526 الذى لمع فى وقت قصير لمعانًا يماثل مئات مليارات النجوم الأخرى فى المجرة معا، وكان سوبرنوفا من النوع ٢، وأطلق عليه اسم SN 1994D.



المؤلف فى سطور

جون جريبين

– لقى الدكتور جون جريبين تدريباً كعالم فيزياء فلكية فى جامعة كمبريدج قبل أن يصبح متفرغًا للكتابة العلمية.

– عمل فى المجلة العلمية "نيتشر"، ومجلة "نيو ساينتست"، وشارك بمقالات فى موضوعات علمية لمجلات وصحف "تايمز" و"جارديان" و"إندبندنت"، وأعد عدة مسلسلات علمية مهمة لإذاعة بى.بى.سى٤ .

– حصل جون جريبين على جوائز عن كتاباته فى بريطانيا والولايات المتحدة الأمريكية وكان زميلاً زائراً فى مجال علم الفلك فى جامعة سوسيكس. وتم انتخابه عضواً فى الجمعية الملكية الأدبية عام ١٩٩٩.

– له عدد من الكتب منها:

بحثا عن قطة شرودنجر

ستيفن هاوكنج: حياة فى العلم (مع مايكل وايت)

بحثا عن سوسى

– ويعتبر جون جريبين أيضاً من كُتّاب الخيال العلمى، ومن كتاباته:

تصورات داخلية

– وهو متزوج وله ابنان ، ويعيش فى إيست سوسيكس.

المترجم فى سطور

عزت عامر

– محرر علمى ومترجم عن الإنجليزية والفرنسية، ينشر فى العديد من المجلات والصحف العربية.

– عمل محرراً لصفحة العلم والتكنولوجيا فى صحيفة "العالم اليوم" المصرية، ومسؤولاً عن صفحة يومية وصفحة طبية أسبوعية فى صحيفة "الاقتصادية" السعودية.

– طُبع له فى المجلس الأعلى للثقافة فى مصر ترجمات كتب: "حكايات من السهول الأفريقية" لآن جاتى، و"بلايين وبلايين" لكارل ساجان "الوراثة وكتاب التحولات"، و"يا له من سباق محموم" لفرانسيس كريك، الذى أُعيد نشره فى مهرجان القراءة للجميع ٢٠٠٤ .

– نُشر له ستة كتيبات للأطفال تحت عنوان "العلم فى حياتنا" عن طريق المركز القومى لثقافة الطفل فى مصر، وينشر مواد علمية مصورة للأطفال فى مجلة "العربى الصغير" الكويتية، ومواد علمية فى مجلة "العربى" وملحقها العلمى.

– له تحت الطبع فى المجلس الأعلى للثقافة ترجمة كتب: "سجون الضوء" لكيتى فرجاسون، و"الانفجار الأعظم" لجيمس ليدسى.

– نُشر له ديوانان "مدخل إلى الحدائق الطاغورية" و"قوة الحقائق البسيطة" ومجموعة قصصية "الجانب الآخر من النهر".

– وتحت النشر ديوان صوفى نثرى بعنوان: "سرٌ سرّى جهراً".